

# Teräsputkisillat

SUUNNITTELUOHJE

2.2.2012





# Teräspankksillat

Suunnitteluohje

2.2.2012

Liikenneviraston ohjeita 2/2012

Liikennevirasto

Helsinki 2012

*Kannen kuva: Jouko Selkämä*

Verkkojulkaisu pdf ([www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi))

ISSN-L 1798-663X

ISSN 1798-6648

ISBN 978-952-255-085-9

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 020 637 373



Taitorakentaminen

Vastaanottaja  
ELY-keskusten Liikenne- ja infrastruktuuri – vastuualueet,  
Liikenneviraston investointi ja kunnossapitotoimialat  
Konsultit

Säädösperusta  
Maantielaki 109 §

Korvaa  
Teräsputkisillat, suunnitteluohje, TIEH 2100054-v-07

Kohdistuvuus  
Liikennevirasto

Voimassa  
2.2.2012 alkaen toistaiseksi

Asiasanat  
Ohjeet, sillansuunnittelu, putkisillat

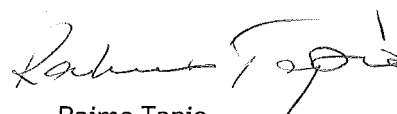
## Teräsputkisillat, suunnitteluohje

Tämä ohje korvaa aikaisemman "Teräsputkisillat, suunnitteluohje, TIEH 2100054-v-07" ohjeen. Ohjeen uudistamistarve on syntynyt eurokoodien käyttöönoton ja mitoitusmenetelmien muutosten vuoksi.

Julkaisu on laadittu Liikenneviraston, Kaitos Oy:n, Miranet Oy:n ja Rumtec Oy:n yhteistyönä. Konsulttina on toiminut Destian Infrasuunnittelu-yksikkö.

Ohjetta sovelletaan eurokoodijärjestelmässä, joka on otettu käyttöön Liikenneviraston väylähankkeiden suunnittelussa 1.6.2010 alkaen. Suunnitteluohjeessa esitetään putkisiltojen toimivuusvaatimukset, uudistuneet suunnitteluperusteet ja suunnitteluohjeet.

Ylijohtaja



Raimo Tapio

Tekninen johtaja



Markku Nummelin

LISÄTIETOJA  
Jani Meriläinen  
Liikennevirasto  
puh. 020 637 3571

## Esipuhe

Tässä uudessa ohjeessa esitetään yleiset laatuvaatimukset ja ohjeet aallotettujen teräspankksilltojen suunnittelua varten. Oleellimmat suunnittelua koskevat muutokset edelliseen julkaisuun verrattuna ovat eurokoodien ja niiden siltoja koskevien kansallisten liitteiden ja soveltamisohjeiden ottaminen myös putkissilltojen suunnittelun lähikohdaksi.

Tämän asiakirjan laatimista on ohjannut asiantuntijaryhmä, jonka puheenjohtajana on ollut 30.4.2011 saakka tieinsinööri Markku Nousiainen Liikenneviraston taitorakenneyksiköstä ja 1.5.2011 alkaen saman yksikön silta-asiantuntija dipl. ins. Jani Meriläinen. Työryhmän jäseninä ovat olleet:

- tieinsinööri Markku Nousiainen, Liikenneviraston taitorakenneyksikkö
- dipl. ins. Jani Meriläinen, Liikenneviraston taitorakenneyksikkö
- dipl. ins. Heikki Lilja, Liikenneviraston taitorakenneyksikkö
- dipl. ins. Ilkka Sinisalo, VR Track Oy, Liikenneviraston edustajana
- dipl.ins. Risto Parkkila, VR Track Oy, Liikenneviraston edustajana
- osastopäällikkö Jouko Selkämaa, Rumtec Oy ja Oy ViaPipe Ab
- toimitusjohtaja Olli Böök, Kaitos Oy
- dipl. ins. Perttu Juntunen, Kaitos Oy
- toimitusjohtaja Juhani Günther, Miranet Oy
- myyntipäällikkö, Timo Palo, Miranet Oy.

Asiakirja on laadittu Destian Infrasuunnittelu-yksikössä, jossa työhön ovat osallistuneet tekn. lis. Torsten Lunabba, dipl. ins. Panu Tolla, dipl. ins Antti Jussila ja dipl. ins Kimmo Julku.

Helsingissä helmikuussa 2012

Liikennevirasto  
taitorakenneyksikkö

## Sisällysluettelo

1	YLEISTÄ .....	7
1.1	Ohjeen tarkoitus ja soveltamisalue .....	7
1.2	Määritelmät .....	8
2	SUUNNITTELUN PERUSTEET .....	10
2.1	Perusvaatimukset .....	10
2.2	Ulkonäkö ja sopivuus ympäristöön .....	10
2.3	Liikenne ja vedenkulku .....	10
2.4	Rakenteen käyttöikä .....	10
2.5	Rakenteen kantavuusvaatimukset .....	11
2.6	Teräspankkityytit .....	11
2.6.1	Putken muoto .....	11
2.6.2	Putken rakenne .....	14
2.7	Putken valinta .....	14
2.7.1	Käyttötarkoitus .....	15
2.7.2	Hydraulinen mitoitus .....	15
2.7.3	Pohjasuhteet .....	16
2.8	Materiaalivaatimukset .....	16
2.8.1	Betoni .....	16
2.8.2	Levymateriaali ja ruuvit .....	16
2.8.3	Metalliset pinnoitteet .....	16
2.8.4	Ei-metalliset pinnoitteet .....	17
2.8.5	Täytöt .....	18
2.8.6	Sallitut mittapoikkeamat .....	19
2.9	Ympäristönsuojelliset näkökohdat .....	20
3	MITOITUS .....	21
3.1	Poikkileikkausarvot .....	21
3.2	Staattiset kuormat .....	22
3.2.1	Pysyvät kuormat .....	22
3.2.2	Tiesillat .....	22
3.2.3	Rautatiesillat .....	24
3.2.4	Kevyen liikenteen sillat .....	25
3.2.5	Ekvivalentti viivakuorma .....	25
3.3	Väsyttävät kuormat .....	27
3.3.1	Tiesillat .....	27
3.3.2	Rautatiesillat .....	27
3.4	Osavarmuusluvut .....	27
3.5	Voimasuureet .....	29
3.5.1	Ruotsalainen mitoitusohje .....	29
3.5.2	FEM .....	29
3.5.3	Normaalivoima .....	30
3.5.4	Momentti .....	30
3.6	Geotekniikka .....	30
3.7	Putki .....	30
3.7.1	Staattinen mitoitus .....	30
3.7.2	Tiesillan taipuma .....	32
3.7.3	Rautatiesillan taipuma .....	32
3.8	Pulttiliitos .....	32

3.9	Laen ja nurkkien vahvistaminen .....	36
3.10	Putken väsymiskestävyys .....	39
3.10.1	Yleistä .....	39
3.10.2	Tiesillat .....	40
3.10.3	Rautatiesillat .....	44
3.11	Liitosten väsymiskestävyys .....	44
3.11.1	Yleistä .....	44
3.11.2	Tiesillat .....	45
3.11.3	Rautatiesillat .....	46
3.12	Käyttöikämitoitus .....	46
3.12.1	Yleistä .....	46
3.12.2	Veden laadun vaikutus .....	46
3.12.3	Olosuhdeluokat .....	46
3.12.4	Teräsputken käyttöikään vaikuttavat tekijät .....	48
3.12.5	Lisäsuojaus .....	49
3.12.6	Yksinkertaistettu käyttöikämitoitus .....	50
4	MUU SUUNNITTELU .....	52
4.1	Putken viiste ja suuntakulma .....	52
4.2	Putken pituus .....	53
4.3	Vierekkäiset putket .....	55
4.4	Perustaminen .....	55
4.4.1	Yleistä .....	55
4.4.2	Sillan painuma .....	56
4.4.3	Teräsholvisillan perustukset .....	57
4.4.4	Perustamistavat .....	58
4.5	Siirtymäkiila .....	59
4.6	Verhoukset ja eroosiosuojaus .....	59
4.7	Tukimuurit .....	59
4.8	Kuivatus .....	59
4.9	Valaistuslaitteet ja kiinnikkeet .....	60
4.10	Tarkkailutapit .....	60
4.11	Alikulkukäytävän päädyn suojaus .....	60
4.12	Kaiteet .....	61
4.13	Aukko tien keski- tai välialueella .....	61
4.14	Maadoitus .....	61

#### LIITTEET

Liite 1	Aallotettujen teräsputkien perustietoja
Liite 2	Perustamistapojen ohjeelliset mallikuvat
Liite 3	Mitoitusesimerkki

# 1 Yleistä

## 1.1 Ohjeen tarkoitus ja soveltamisalue

Aallotettuja teräspanutkia käytetään tie- ja ratarakenteissa siltoina ja rumpuina.

Tässä asiakirjassa esitetään ohjeet ja yleiset laatuvaatimukset vapaa-aukoltaan vähintään 2-metrinen aallotettujen teräspanutkisiltojen suunnittelua varten eurokoodien mukaisesti. Rautatiesiltana toimivan teräspanutkisillan jännemitta saa olla enintään 8 metriä.

Teräspanutkisillan rakentamista varten on aina tehtävä mitoituskalkelmat ja laadittava rakennussuunnitelma. Kalkelmat toimitetaan tilaajalle rakennussuunnitelman mukana.

Ohje ei suoraan sovellu rumpuputkien, olemassa olevien siltojen sujutuskorjaamisen eikä tunkkaamalla tai poraamalla tehtävien teräspanutkisiltojen suunnitteluun. Näihin tapauksiin liittyvät suunnittelukysymykset suositellaan käsiteltäväksi tapauskohtaisesti. Tapauskohtaisesti ratkaistavia asioita ovat mm. ympäristäytön maaparametrit, olemassa olevien rakenteiden vaikutus teräspanutkisillan toimintaan ja maan tiivistettyyteen. Olemassa olevien teräspanutkisiltojen sujuttamista, puolipohjausta ja ruis-kubetonointia on käsitelty SILKO-ohjeessa 2.341.

Ohjeita ja laatuvaatimuksia putken rakentamista varten on esitetty Liikenneviraston ohjeessa *Teräspanutkisillat, rakentamisen laatuvaatimukset* /26/.

## 1.2 Määritelmät

**Aallotettu teräsputki**

Vesistöissä ja alikulkukäytävänä käytettävä putkirakenne, joka on valmistettu aallotetusta teräslevystä tai teräsnauhasta.

**Aallotus**

Teräslevyn tai -nauhan aaltomainen muoto. Aallotus ilmoitetaan profiilin aallon pituutena ja korkeutena.

**Alempi väsymisraja**

Jännitysraja, jonka alapuolella rakenne kestää äärettömän määrän kuormitusyklejä (SFS-EN 1993-1-9)

**Box culvert**

Teräsholvisilta, jossa laakean kaaren alimmat osat ovat suoria.

**Ekvivalentti viivakuorma  $p_{\text{traffic}}$** 

Laskennallinen tietä vasten kohtisuorassa oleva viivakuorma [kN/m].

**FEM (Finite Element Method)**

Elementtimenetelmä. Numeerinen ratkaisumenetelmä, jossa ratkaistava tehtävä jaetaan rajalliseen määrään elementtejä.

**Jännemitta**

Teräsputkisillan jännemitta D on suurin mahdollinen vaakamitta putken seinien neutraaliakseleiden välillä.

**Kierresaumattu putki**

Putkirakenne, joka on valmistettu teräsnauhasta joko saumaamalla tai hitsaamalla.

**Käyttöikä**

Ajanjakso, jonka ajan rakenteen ominaisuudet säilyvät rakenteelta vaadittavalla tasolla.

**Monilevyrakenne**

Putkirakenne, joka on valmistettu aallotetuista teräslevyistä kokoamalla.

**Olosuhdeluokka**

Putken eri osat luokitellaan käyttöolosuhteiden perusteella olosuhdeluokkiin 1–4.

**Peitesyvyys**

Putkisillan laen yläpinnan pienin pystysuora etäisyys ylittävän tien pinnasta tai radan kv:stä.

**Putkisilta**

Maahan upotettu aallotettu teräsputki tai holvi, joka toimii yhteisvaikutuksessa maan kanssa siltana. Putkisillan jännemitta on vähintään 2 metriä.

#### **Putken taivutusmomentti**

Positiivisella taivutusmomentilla tarkoitetaan taivutusmomenttia, joka venyttää profiilin putken sisäpuoleisia huippuja. Negatiivinen taivutusmomentti venyttää putken ulkopuolisia huippuja.

#### **Redusoitu peitesyvyys**

Peitesyvyys redusoidaan putkisillan mitoitusta varten huomioimalla täyttötöystä johutuva teräspanken laen nousu.

#### **Siltapaikkaluokitus**

Luokitus, jonka tarkoituksena on tuottaa siltapaikalle estetiikaltaan ja arkkitehtuuriltaan siltapaikan kriteerien perusteella sopivia ja riittävän tasokkaita siltoja. Siltapaikkaluokkien kriteereinä ovat siltapaikan sijainti, kulttuuriarvo ja maisema-arvo.

#### **Suuntakulma**

Väylän keskilinan ja putken keskilinan välinen kulma väylien keskilinjasta myötävään mitattuna.

#### **Teräsholvisilta**

Teräsholvisilta on rakenne, jossa teräskaari lepää erillisten perustusten päällä. Teräsholvi luetaan teräspankisillaksi erilaisesta rakenteestaan huolimatta.

#### **Toteutusluokka**

Luokiteltu kokoelma toteutukselle eriteltyjä vaatimuksia, jotka voivat koskea koko rakennustyötä tai yksittäistä kokoonpanoa. Teräspankisillat kuuluvat toteutusluokkaan 3.

#### **Vakioamplitudinen väsymisraja**

Jännitysvaihtelun raja-arvo, jonka alapuolella ei esiinny väsymisvaurioita vakioamplitudisella jännitysvaihtelulla. Vaihtuva amplitudisessa jännitysvaihtelussa kaikkien jännitysvaihteluiden pitää alittaa tämä raja, että väsymisvaurioita ei esiinny (SFS-EN 1993-1-9).

#### **Viiste**

Putken pään kalteva osa, joka on usein tieluiskan kaltevuudessa.

#### **Väsymisluokka**

Rakenneyksityiskohdan annettu kestävyysluku, joka vastaa kahden miljoonan jännityssyklin kestävää jännityksen vaihteluväliä (SFS-EN 1993-1-9).

#### **Yhteisvaikutuskerroin**

Kerroin jolla huomioidaan normaalivoiman ja taivutusmomentin samanaikainen vaikutus.



## 2 Suunnittelun perusteet

### 2.1 Perusvaatimukset

Teräsputkisiltojen suunnittelu tehdään standardien EN 1990, EN 1991, EN 1992, EN 1993 ja EN 1997, niiden kansallisten liitteiden ja soveltamisohjeiden (NCCI) sekä tämän ohjeen mukaan.

Teräsputkisilta katsotaan kuuluvan seuraamusluokkaan CC2, ellei tilaaja ole toisin ilmoittanut.

### 2.2 Ulkonäkö ja sopivuus ympäristöön

Teräsputkisillan soveltuvuus on arvioitava siltapaikkakohtaisesti ja suunnittelun perusteeksi on määritettävä ympäristöön sopivuuden asettamat vaatimukset aukon koolle ja muodolle, rakennetyypille, pintakäsittelylle ja putken päiden verhoukselle. Teräsputkisillan ja siltapaikan on täytettävä Liikenneviraston määräämät siltojen ulkonäköä ja siltapaikkojen viimeistelyä koskevat vaatimukset. Vaatimukset määräytyvät tilaajan asettaman siltapaikkaluokan mukaan.

### 2.3 Liikenne ja vedenkulku

Rakenteen on täytettävä asetetut aukkovaatimukset ja mahdollistettava veden esteetön virtaus putken läpi. Aukkovaatimuksesta on hankittava alueellisen Ely-keskuksen lausunto lupapäätöksen tarpeesta ja aukon vähimmäiskoosta. Lausunnon perusteella hankkeelle on haettava aluehallintoviraston vesitalouslupa ja kiireellisissä tapauksissa töiden aloittamislupa.

### 2.4 Rakenteen käyttöikä

Liikenneviraston siltojen ylläpidon toimintalinjojen mukaan teiden teräsputkisiltojen normaali suunnittelukäyttöikä on 50 vuotta ja rautatiesiltojen 100 vuotta. Jos putkisilta sijaitsee vilkasliikenteisen tien (kvl > 3000 ajon./vrk.) alla tai peitesyvyys on yli 3 metriä, niin myös tien putkisillan suunnittelukäyttöikä on 100 vuotta.

Suunnittelukäyttöiän saavuttamisen edellytyksenä on sillan kantavien pääraakenteiden laatuvaatimusten mukainen rakentaminen sekä hyvällä hoidolla ja ylläpidolla varmistettu säilyvyys. Muita rakenneosia voidaan korjata ja uusia useitakin kertoja.

Suunnittelukäyttöikä olosuhdeluokan ohella vaikuttaa putken suojausmenetelmän määrittämiseen. Suunnittelukäyttöikä on aina ilmoitettava suunnitelmassa.

Jos tavoiteltu suunnittelukäyttöikä ei ole käyttöikämitoituksen perusteella saavutettavissa, aukkomittoihin on lisättävä vähintään 200 mm, jotta sujutusmenetelmän käyttö olisi tarvittaessa mahdollinen korjausmenetelmä tulevaisuudessa. Sujutettava

pankksilla on mitoitettava aina vähintään 50 vuoden käyttöiälle ja sujutusmahdollisuudesta on mainittava suunnitelmissa.

## 2.5 Rakenteen kantavuusvaatimukset

Tiessä tai radassa olevan rakenteen on kestettävä siihen kohdistuvat kuormat, jotka ovat Liikenneviraston määräämät tie-, rautatieliikenteen tai kevyen liikenteen sillan kuormat sekä muut siltoihin kohdistuvat kuormat eurokoodin soveltamisohjeen *Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet* - NCCI 1 /11/ mukaan niin, että ne täyttävät standardin SFS-EN 1991-2 /3/ ja sen kansallisen liitteen vaatimukset. Rakenteella ja sen perustuksilla tulee olla riittävä varmuus murtoon nähden eri murtotavat huomioon ottaen eikä niihin saa syntyä haitallisia muodonmuutoksia.

Sillan suunnittelija määrittää sillan sallitun painuman ja painumaeron eurokoodin soveltamisohjeen *Geotekninen suunnittelu* - NCCI 7 /10/ mukaisesti niin, että ne täyttävät standardin SFS-EN 1997-1 /8/ ja sen kansallisen liitteen (LVM) vaatimukset. Sillan perustaminen suunnitellaan siten, että tämä vaatimus täyttyy. Rakenteen mitoitus tehdään luvussa 4 esitetyillä menetelmillä.

## 2.6 Teräspankkityytit

### 2.6.1 Putken muoto

Aallotetut teräspankkitet jaetaan muodoltaan seuraaviin ryhmiin:

- pyöreä
- matalarakenteinen
- alikulkukäytävätyyppi
- elliptinen ja vaakaelliptinen
- teräsholvi.

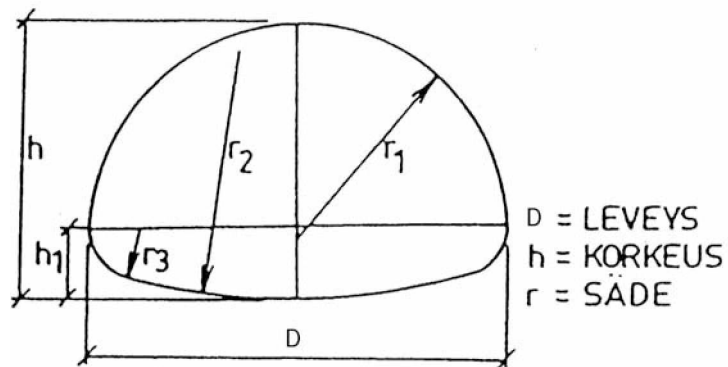
Mainittuja pankityyttejä käytetään sekä vesistösiltoina että alikulkukäytävinä. Putken muoto on harkittava kussakin tapauksessa erikseen paikalliset olosuhteet ja erityisnäkökohdat huomioon ottaen. Teräsholvisilta luetaan pankksillaksi erilaisesta rakenteestaan huolimatta.

**Pyöreä** putki soveltuu rautatiesiltoihin, vesistösiltoihin sekä ulkoilua tai maataloutta palveleviin alikulkukäytäviin.

**Matalarakenteinen** putki soveltuu alikulkukäytäviin sekä matalan penkereen alla oleviin vesistösiltoihin. Matalarakenteinen putki voi tietyllä vesisyvyydellä johtaa jopa 50 % enemmän vettä kuin samalle syvyydelle perustettu korkeudeltaan yhtä suuri pyöreä putki.

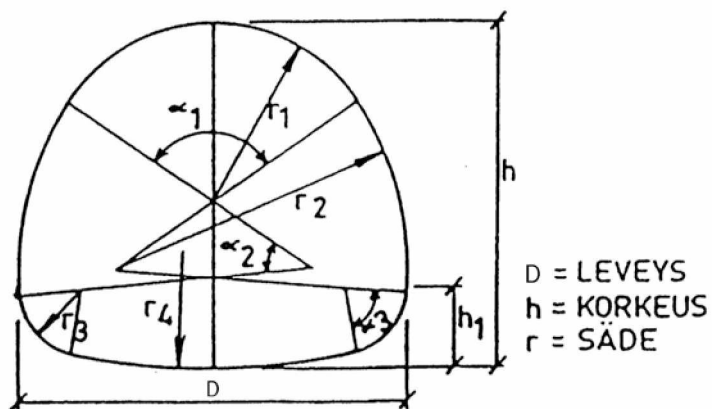
Matalarakenteisen putken käyttöä rajoittaa putken alanurkkien kohdalle syntyvä suuri pohjarasitus, mikä asettaa erityisiä vaatimuksia pohjamaan kantavuudelle. Matalarakenteinen putken sijasta voidaan käyttää esimerkiksi vierekkäisiä pyöreitä putkia.

Matalarakenteisia putkia on useita tyyttejä, joissa alanurkan kaarevuussäde on erilainen.



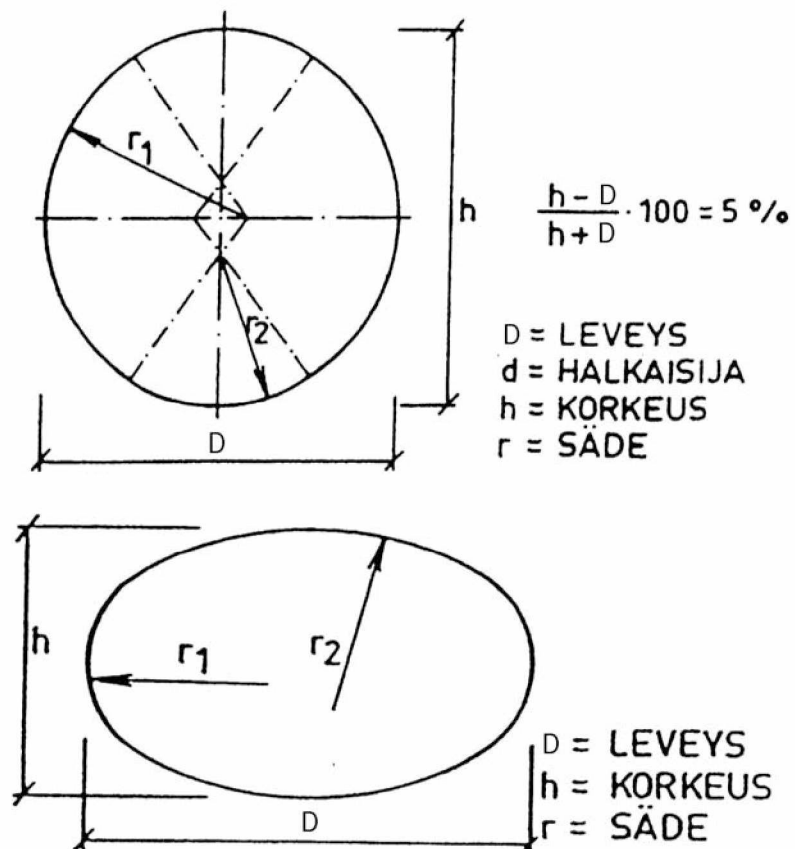
Kuva 2.1. Matalarakenteisen putken poikkileikkaus.

**Alikulkukäytävätyyppiä** käytetään nimensä mukaisesti pääasiassa alikulkukäytävänä. Suurta alikulkukorkeutta tarvittaessa alikulkukäytävä- ja elliptinen muoto ovat toistensa vaihtoehtoja.



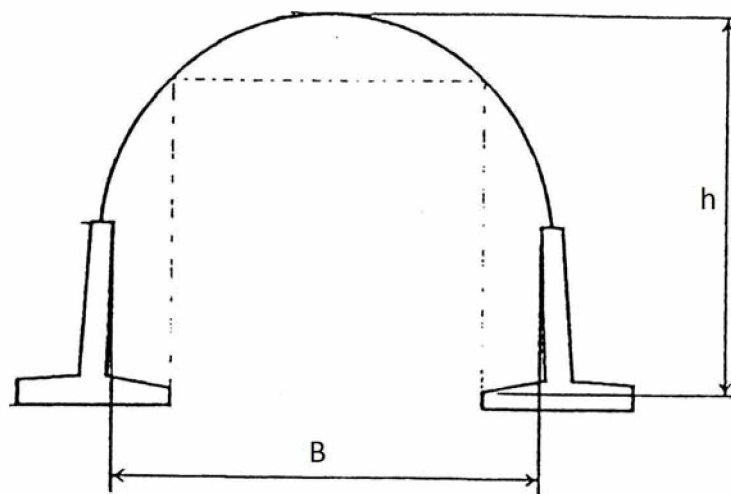
Kuva 2.2. Alikulkukäytävätyyppisen putken poikkileikkaus.

**Elliptinen** putki (elliptisyys pystysuunnassa 5 %) on vaihtoehtoinen rakenne pyöreälle putkelle tai alikulkukäytävätyypille. **Vaakaelliptinen** putki (elliptisyys vaakasuunnassa 15 %) soveltuu käytettäväksi matalarakenteisen putken vaihtoehtona.



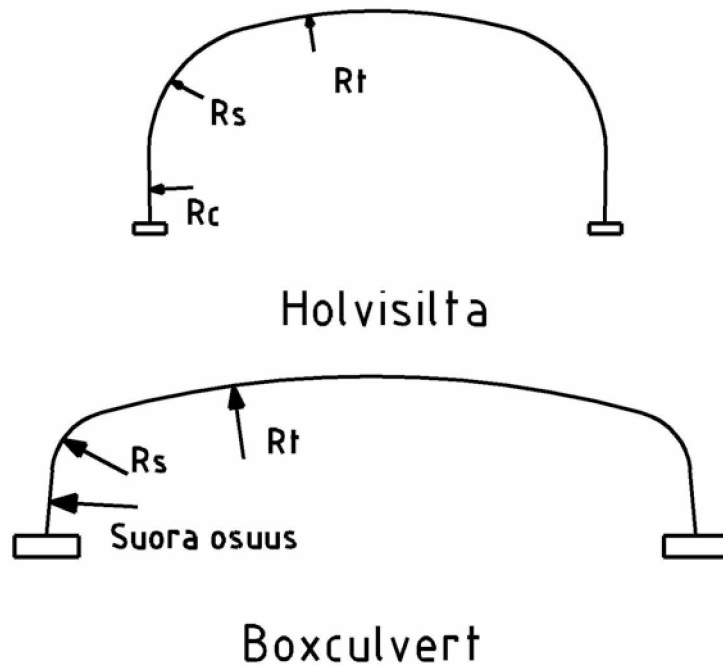
Kuva 2.3. Elliptisen ja vaakaelliptisen putken poikkileikkaus.

**Teräsholvisilta** on rakenne, jossa teräskaari lepää erillisten perustusten päällä. Sen pääasiallisia käyttökohteita ovat kantavalle perusmaalle rakennettavat alikulkukäytävät, alikäytävät ja vesistö sillat. Vesistö sillan uoma säilyy tällöin maapohjaisena.



Kuva 2.4. Betonijalkaisen teräsholvisillan poikkileikkaus.

**Box culvert** on teräsholvisilta, jossa kaaren alimmat osat ovat suoria. Kehämallinen box culvert silta on holvisillan tapaan alikulkukäytävän tapainen silta, mutta se soveltuu myös risteyssiltoihin.



Kuva 2.5. Useampisäteinen teräsholvisilta ja box culvert silta /2/.

### 2.6.2 Putken rakenne

Teräsputkisillat jaetaan rakenteeltaan seuraaviin ryhmiin:

- Monilevy rakenne. Putkirakenne, joka on valmistettu aallotetuista teräslevyistä kokoamalla.
- Kierresaumattu rakenne. Putkirakenne, joka on valmistettu teräsnauhasta joko saumaamalla tai hitsaamalla.

## 2.7 Putken valinta

Putken koon, muodon ja rakennetyypin valinta tehdään rakennuspaikan olosuhteiden ja rakenteellisen mitoituksen perusteella vaihtoehtoja vertailemalla. Vertailussa otetaan huomioon mm. seuraavat tekijät:

- käyttötarkoitus
- ulkonäkö
- hydraulinen mitoitus
- pengerkorkeus
- pohjaolosuhteet
- veden ja maan laatu
- kustannukset

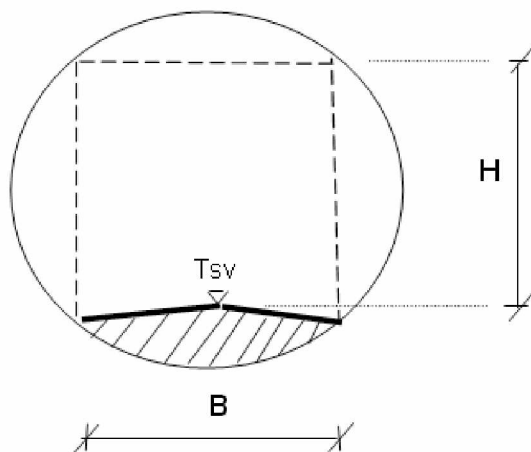
### 2.7.1 Käyttötarkoitus

Vesistösilan tyyppi valitaan lähinnä vaaditun aukon koon ja kunnossapitönäkökohtien perusteella. Käyttötarkoituksen kannalta tyyppin valintaan vaikuttava tekijä on veneliikenne.

Alikulkukäytävän tyyppin valintaan käyttötarkoituksen kannalta vaikuttavia tekijöitä ovat liikenne, maatalous ja ulkoilu. Aukon koko mitoitetaan alikulkevan liikenteen ja kunnossapitokaluston vaatiman tilan mukaan.

Liikenteen vaatiman aukon mitat määritetään yleensä tien rakennussuunnitelmassa. Jos aukkovaatimusta ei ole annettu, alikulkukäytävien suorakaiteenmuotoisen vapaan liikennetilan leveyden ja korkeuden vähimmäismitat ovat (kuva 2.6):

- Koneellisesti kunnossapidettävissä alikulkukäytävissä
  - leveys  $B \geq 3,5 \text{ m}$
  - korkeus  $H \geq 3,0 \text{ m}$ .
- Luontopoluilla ja eläinten kulkua varten rakennettavissa tunneleissa, joissa ei ole koneellista kunnossapitoa
  - leveys  $B \geq 2,0 \text{ m}$
  - korkeus  $H \geq 2,5 \text{ m}$ .



Kuva 2.6. Alikulkukäytävän vapaan liikennetilan vähimmäismitat.

Kun teräspanksilta toimii risteysiltana, vapaan liikennetilan korkeuteen on lisättävä 0,5 metrin törmäysriskivara.

Sillan rakennussuunnitelmassa on aina esitettävä vaaditut liikennetekniset mitat, joita rakennustyössä ei saa alittaa.

### 2.7.2 Hydraulinen mitoitus

Vesistösilan aukkovaatimus määritetään yleensä Ely-keskuksen lausunnossa, jolloin hydraulista mitoitusta ei tarvitse tehdä. Tarvittaessa hydraulinen mitoitus vesiaukon koon ja putken pohjan korkeusaseman määrittämiseksi voidaan tehdä Liikenneviraston julkaisun *Teiden suunnittelu IV. Kuivatus* kohdan 4.46 mukaisesti /24/.

Putken aukon kokoa ja muotoa määritettäessä otetaan vaihtoehtoina huomioon erimuotoiset yksittäiset putket sekä myös mahdollisuus käyttää kahta tai useampaa putkea rinnakkain. Kaksoisputken tai useampienkin putkien käyttö voi tulla kyse-

seen, jos virtaama on suuri ja korkeutta on vähän käytettävissä. Putket voivat olla myös erikokoisia.

### 2.7.3 Pohjasuhteet

Sillan pohjasuhteet selvitetään ohjeen Sillan geotekninen suunnittelu /35/ mukaan, niin että ne täyttävät standardin SFS-EN 1997-1 /8/ ja sen kansallisen liitteen (LVM) sekä eurokoodin soveltamisohjeessa *Geotekninen suunnittelu - NCCI 7 /10/* esitetyt vaatimukset. Osana pohjatutkimuksia selvitetään pohjamaan ja veden korroosioolosuhteet.

Vaihtelevissa pohjaolosuhteissa on yleensä tarkoituksenmukaista selvittää pohjasuhteet siltapaikan alueella sellaisessa laajuudessa, että silta voidaan sijoittaa mahdollisimman edulliseen paikkaan.

## 2.8 Materiaalivaatimukset

### 2.8.1 Betoni

Teräsholvin anturoissa käytetään säilyvyyden varmistamiseksi siltabetonia, jonka lujuusluokka ja pakkasenkestävyysvaatimus määritetään eurokoodin soveltamisohjeessa *Betonirakenteiden suunnittelu - NCCI 2 /9/* mukaisesti ottaen huomioon sillan taivokekäyttöikä.

### 2.8.2 Levymateriaali ja ruuvit

**Monilevyrakenteen** levymateriaalin tulee täyttää vähintään standardin SFS-EN 10025 *Kuumavalssatut rakenneteräkset* luokan S235 JR vaatimukset /17/.

**Kierresaumatun rakenteen** levymateriaalin tulee täyttää standardin SFS-EN 10346 *Jatkuvatoimisella kuumaupotusmenetelmällä pinnoitetut ohutlevyteräkset. Tekniset toimitusehdot.* /15/

Ruuvien myötölujuuden ( $R_{eL}$ ) on oltava vähintään 320 MPa. Ruuvityypin on oltava putken toimittajan hyväksymä.

Teräksen myötöraja ja vetomurtolujuus määräytyy eurokoodien SFS-EN 1993-1-1 /4/ mukaan. Levyteräksen kestävyuden mitoitusarvot saadaan jakamalla myötöraja  $f_y$  taulukon 3.2 mukaisella varmuuskertoimella  $\gamma_{M0}$ . Kun kierresaumattuja putkiprofiileja tehdään kylmämuokkaamalla matalarakenteisiksi putkisilloiksi, teräksen myötöraja on jaettava ylimääräisellä varmuuskertoimella  $\gamma_{M0red} = 1,15$ .

### 2.8.3 Metalliset pinnoitteet

Monilevyrakenteen kuumasinkityksen tulee täyttää standardin SFS-EN ISO 1461 *Valurauta- ja teräskappaleiden kuumasinkkipinnoitteet. Spesifikaatiot ja testausmenetelmät* /30/. Standardissa määritellään keskimääräinen kerrospaksuus ja paikallinen vähimmäispaksuus. Vähimmäisvaatimukset sinkkikerroksen paksuudelle ovat taulukossa 2.1.



*Taulukko 2.1 Monilevyrakenteen kuumasinkkipinnoitteen vähimmäispaksuuden vaatimukset.*

Teräksen ainevahvuus ( $t_y$ )	Keskimääräinen kerrospaksuus (minimi) [ $\mu\text{m}$ ]	Paikallinen kerrospaksuus (minimi) [ $\mu\text{m}$ ]
$t > 6 \text{ mm}$	85	70
$3 < t \leq 6 \text{ mm}$	70	55
$1,5 \leq t \leq 3 \text{ mm}$	55	45

**Kierresaumatun rakenteen kuumasinkityksen** tulee täyttää standardin SFS-EN 10346 *Jatkuvatoimisella kuumaupotusmenetelmällä pinnoitetut ohutlevyteräket*. *Tekniset toimitusehdot /15/*. Standardi koskee sekä sinkki- että alusinkkituotteita.

Standardeissa määritellään pinnoitteen massa molempien puolien yhteenlaskettuna arvona. Massan perusteella on taulukkoon 2.2 laskettu pinnoitteen paksuuden keskiarvo ja yhden mittausalueen vähimmäisarvo.

*Taulukko 2.2. Sinkityksen paksuuden määrittäminen kierresaumatulle rakenteelle.*

Sinkitys	Massa [ $\text{g}/\text{m}^2$ ] (molemmat puolet yhteensä)		Paksuus [ $\mu\text{m}$ ]	
	Kolmen kokeen keskiarvo	Yhden kokeen arvo	Molempien puolien keskiarvo	Yhden mittausalueen vähimmäisarvo
Kuumasinkitys Z600	600	510	42	32
Kuumasinkitys Z840	840	714	60	46
Kuumasinkitys Z1000	1000	850	70	53
Kuumasinkitys Z1200	1200	1020	85	65

Pinnoitteet Z1000 ja Z1200 eivät vielä sisälly edellä mainittuihin jatkuvatoimisen kuumaupotusmenetelmän standardeihin. Niiden todentaminen tapahtuu kappaletavarastandardin SFS-EN ISO 1461 /30/ mukaan.

Sinkityksen paksuus ja lisäsuojauksen tarve määritetään käyttöikämitoituksessa.

**Ruuvien ja muttereiden** tulee olla kuumasinkittyjä ja sinkkikerroksen paksuuden 45  $\mu\text{m}$ . Ruuvien väljyys on valittava siten, ettei sen sinkitys vaurioidu kiristettäessä.

#### 2.8.4 Ei-metalliset pinnoitteet

Ei-metallisia pinnoitteita ovat maalit sekä polymeeripinnoitteet, kuten epoksi, polyuretaani tai polyeteeni. Nämä pinnoitteet ovat sinkityn teräspinnan lisäsuojausmenetelmiä.

Ei-metallisten pinnoitteiden osalta noudatetaan seuraavia standardeja:

- SFS-EN ISO 12944-1...8 *Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä.* /18/

- SFS-EN 10169. Orgaanisilla aineilla pinnoitetut (muovipinnoitetut) ohutlevyteräket. Tekniset toimitusehdot /19/
- ASTM A742M Specification for Steel Sheet, Metallic-coated, and Polymer Precoated for Corrugated Steel Pipe /22/

### 2.8.5 Täytöt

Alus- ja ympärystäytömmateriaalin tulee täyttää julkaisussa InfraRYL 2006. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset, osa 1 Väylät ja alueet /12/ esitettyt jakavan tai kantavan kerroksen materiaalin laatuvaatimukset eikä se saa sisältää läpimitaltaan yli 63 mm kiviä. Jos ympärystäytöjen mitat eivät täytä em. ohjeen vaatimuksia, voidaan tilaajan suostumuksella käyttää pienempiä arvoja. Pienempien ympärystäytöjen toteuttaminen vaatii yleensä erityisratkaisuja, kuten esimerkiksi betonointia.

Suunnittelija määrittää sillan rakennussuunnitelmassa sekä alus- että ympärystäytölle tiiviysvaatimuksen kuivairtotilavuuspainona, joka voi olla joko 92 % tai 95 % parannetulla proctorkokeella määritetystä maksimi kuivairtotilavuuspainosta.

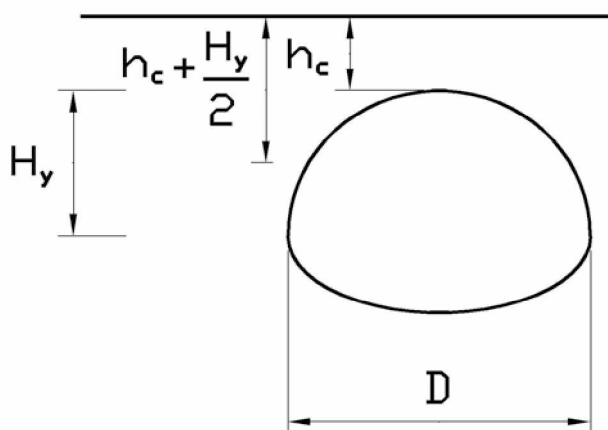
Teräsputkisillan alus- ja ympärystäytön maaparametreina käytetään taulukossa 2.3 ja kuvassa 2.8 esitettyjä arvoja, kun alus- ja ympärystäytöt täyttävät teräsputkisillan rakentamisen laatuvaatimuksissa /26/ esitettyt materiaali- ja tiiviysvaatimukset. Väliarvot interpoloidaan suoraviivaisesti.

Taulukko 2.3 Alus- ja ympärystäytön maaparametrit.

	Kantavan tai jakavan kerroksen materiaali (murske Gp 0/63)	Jakavan kerroksen materiaali (luonnonsora)
Tangenttimoduuli [MPa] kun $h_c + H_y/2 = 1$ m	48	38
Tangenttimoduuli [MPa] kun $h_c + H_y/2 = 10$ m	65	55
Sisäinen kitkakulma $\phi_k$ (°)	45	40
Tilavuuspaino $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	21	20
$h_c$ on täyttösyvyys [m] $H_y$ on putken yläosan korkeus [m], mitataan putken uloimmista pisteistä putken lakipisteeseen.		

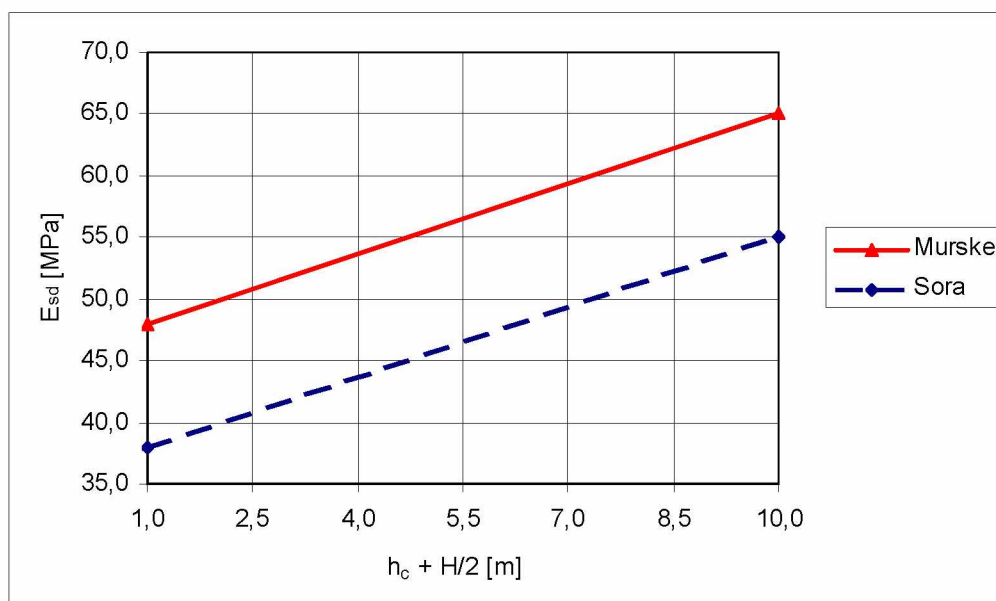
Suunnittelijan tulee ilmoittaa mitoituksessa käyttämänsä täyttömaalajit ja maaparametrit laskelmissa ja täyttömaalajit piirustuksissa. Mikäli maalajit rakennustyön aikana muutetaan, asia käsitellään suunnitelmanmuutoksena.

Putkisillan teräsrakenteen väsymismitoitusta tehtäessä tangenttimoduuleja voidaan korottaa 10 %.



Kuva 2.7 Maamoduulin tarkastelusyvyys.

Mikäli rakentamistyössä ei saavuteta alus- ja ympäristäytölle vaatimukseksi asetettua tiiviysastetta 95 % parannetulla proctor-kokeella määritetystä maksimi kuivairto-tilavuuspainosta, on taulukossa 2.3 tai kuvassa 2.8 esitettyjä moduuliarvoja redusoitava. Mikäli saavutettu tiiviysaste on 92 %, kerrotaan moduuliarvot kertoimella 0,65. Väliarvot interpoloidaan suoraviivaisesti. 92 % huonompaa tiiviysastetta ei hyväksytä.



Kuva 2.8 Maamoduuli eri syvyyksillä (95 % parannettu Proctor)

## 2.8.6 Sallitut mittapoikkeamat

Putken suunnittelumitoissa tulee ottaa huomioon rakentamista koskevat valmiin rakenteen laatuvaatimukset ja toleranssit /26/, erityisesti seuraavat putken lopulliseen valintaan liittyvät vaatimukset: Sillan vapaa-aukon sallittu poikkeama sillan rakennussuunnitelmassa esitetystä mitasta on  $\pm 2,5$  % ja putken korkeuden  $\pm 2$  % vapaa-aukon mitasta laskettuna. Rakennussuunnitelmassa esitetyt liikennetekniset mitat ja peitesyvyyden vähimmäisarvo (tiesilloissa 500 mm, rautatiesilloissa 1400 mm) eivät saa alittua.

Suunnitelmissa on esitettävä aukon vapaan sisätilan mitat tai kuvan Kuva 2.6. Alikulkukäytävän vapaan liikennetilan vähimmäismitat. mukaiset aukon liikennetekniset mitat, joita ei saa alittaa. Rakennussuunnitelma on päivitettävä vapaa-aukon ja korkeuden mittojen osalta, kun lopullinen putkityyppi on valittu.

Ilman uutta mitoitusta putken korkeus- ja/tai leveysmittoja saa muuttaa korkeintaan  $0,01 \cdot D$ , kuitenkin enintään 50 mm ja vain siten, että muoto poikkeama säilyy em. suuruisena ja kaikkialla samansuuntaisena poikkileikkauksen kaikissa osissa. Putken teräsmateriaalin lujuutta tai aallotetun levyn jäykkyyttä, taivutusvastusta, pinta-alaa tai muita levyn lujuuteen ja jäykkyyteen vaikuttavia arvoja ei saa alentaa.

## 2.9 Ympäristönsuojelulliset näkökohdat

Tämän ohjeen mukaisesti suunnitellut teräsputkisillat eivät aiheuta rakenteista johtuvia ympäristöhaittoja. Pintakäsittelyt tulee tehdä maalaamo-olosuhteissa ja sinkitys ja lisäsuojauksena käytettävät maalit ja muut pinnoitteet kuluvat niin hitaasti ja pieninä pitoisuuksina, niin että niistä ole vaaraa ympäristölle.

## 3 Mitoitus

### 3.1 Poikkileikkausarvot

Teräsputkisilloissa käytettävien profiilien poikkileikkausarvoja on esitetty liitteessä 1.

Teräsputkisiltojen profiilien pienimmät sallitut poikkipinta-alat ovat taulukon 3.1 mukaiset. Yksityisteillä taulukon poikkipinta-alat voidaan kertoa luvulla 0,8.

*Taulukko 3.1 Profiilien pienimmät sallitut poikkipinta-alat [cm<sup>2</sup>/m] ja niitä vastaavat ohjeelliset levypaksuudet [mm].*

Profiili**	Tiesillat			Rautatiesillat		
	2,0 m ≤ D < 4,0 m	D ≥ 4,0 m	Sillan ali on liikennettä*)	2,0 m ≤ D < 4,0 m	D ≥ 4,0 m	Sillan ali on liikennettä
Pinta-ala [cm <sup>2</sup> /m]	≥ 25	≥ 35	≥ 45	≥ 35	≥ 45	≥ 55
C3 [mm]	≥ 2,50	ei käytetä	ei käytetä	≥ 3,25	ei käytetä	ei käytetä
C5 [mm]	≥ 2,00	≥ 2,50	≥ 3,25	≥ 2,50	≥ 3,25	≥ 4,00
A2 [mm]	≥ 2,50	≥ 3,00	≥ 4,00	≥ 3,00	≥ 4,00	≥ 4,75
A12 [mm]	≥ 2,50	≥ 3,00	≥ 3,75	≥ 3,00	≥ 3,75	≥ 4,50
A3 [mm]	ei käytetä	≥ 3,00	≥ 3,50	ei käytetä	≥ 3,50	≥ 4,25
A4 [mm]	ei käytetä	≥ 3,00	≥ 3,50	ei käytetä	≥ 3,50	≥ 4,25
*) Jos tiesillan ali on liikennettä ja putken leveys D < 4,0 m, niin pienin sallittu poikkipinta-ala on 35 cm <sup>2</sup> /m.						
**) Profiilien poikkileikkaustiedot liitteessä 1.						

Teräsputkisillan profiililla on oltava riittävä jäykkyys asennuksen mahdollistamiseksi. Teräsputken asentaminen työmaalla helpottuu, kun profiilin jäykkyyttä kasvatetaan.

Uudet vesistön ylittävät teräsputkisillat suunnitellaan siten, että teräslevyn paksuus ja pulttiliitosten lujuus on sama koko poikkileikkauksessa. Tällä tavalla ennakoidaan putkisillan alaosien voimakkaampi syöpyminen. Olemassa olevien putkisiltojen kantavuustarkasteluja tehtäessä todelliset levypaksuudet, pulttiliitosten lujuudet ja rasi-  
tusten todellinen jakautuminen voidaan ottaa kantokykyä arvioitaessa huomioon.

## 3.2 Staattiset kuormat

Teräsputkisillan suunnittelukuormat ovat Liikenneviraston eurokoodin soveltamisohjeen *Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet - NCCI 1 /11/* mukaiset niin, että ne täyttävät standardin SFS-EN 1991-2 /3/ ja sen kansallisen liitteen vaatimukset.

Teräsputkisiltojen kuormien jakaantuminen maan ja teräsrakenteen välillä ja teräsrakenteen rasitukset lasketaan käytettävän mitoitusmenetelmän mukaan.

Teräsputkisillassa tukipainuma-, lämpötila-, sivusysäys- ja tuulikuormia ei yleensä tarvitse huomioida. Jarrukuormat voidaan niin ikään jättää huomioon ottamatta kun putken vaakamitta on alle 10 m tai putkisillan korkeuden suhde putken vaakamittaan  $h/D \leq 0,4$ . Edellä mainitut kuormat tulee kuitenkin sisällyttää teräsholvisillan erillisten perustusten mitoitukseen.

### 3.2.1 Pysyvät kuormat

Maanpaineesta tulevat kuormat sisältyvät ruotsalaisen käsikirjan /2/ voimasuureiden laskentaan. Poikkeuksena tästä ovat teräsputkisiltojen suuaukkojen viisteet, joita tulee mitoittaa erikseen maanpaine kuormille.

Putkeen kohdistuvasta ympäristäytöstä ja rakennekerroksista aiheutuva pystysuora paine määritetään kaavalla

$$p_m = \gamma \cdot h_c \quad \{1\}$$

missä

$\gamma$  on maan tilavuuspaino [kN/m<sup>3</sup>]  
 $h_c$  on peitesyvyys [m]

Maan tilavuuspainona käytetään taulukon 2.3 mukaisia arvoja riippumatta muista siltojen kuormia koskevista ohjeista ja pohjavedenpinnan tasosta.

Yläpuolisen ja ympäristäytön ominaisuuksien vaihtelut otetaan huomioon kerrosten kuormavarmuuskertoimien avulla. Ympäristäytön ja yläpuolisen oman painon kuormavarmuuskertoimet tulee valita sen mukaan, miten saadaan epäedullisin vaikutus. Samalle maamateriaalille ei kuitenkaan tarvitse asettaa eri varmuuskertoimia, kun sitä käytetään sekä yläpuolisessa että ympäristäytössä.

### 3.2.2 Tiesillat

Teräsputkisillan tieliikennekuorma on määritetty eurokoodin soveltamisohjeessa *Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet - NCCI 1 /11/*. Tiesillan mitoituksessa käytetään kuormakaavioille LM1 ja LM2 kaavojen {2a} ja {2b} mukaisia sovituskertoimia ellei tilaajan kanssa ole toisin sovittu. Sovituskertoimia ei käytetä väsytyksessä kuormakaavioon LM2.

$$\alpha_{qi}, \alpha_{Qi}, \beta_Q = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{D - 2m}{4m} \quad \text{kun } 2 \text{ m} \leq D \leq 6 \text{ m} \quad \{2a\}$$

$$\alpha_{qi}, \alpha_{Qi}, \beta_Q = 1,0$$

kun  $D > 6$  m

{2b}

missä

$D$  on sillan jännemitta [m]

Kaistojen ulkopuolelle jäävillä alueilla kuormia ei ole, joten  $\alpha_{qr} = 0$

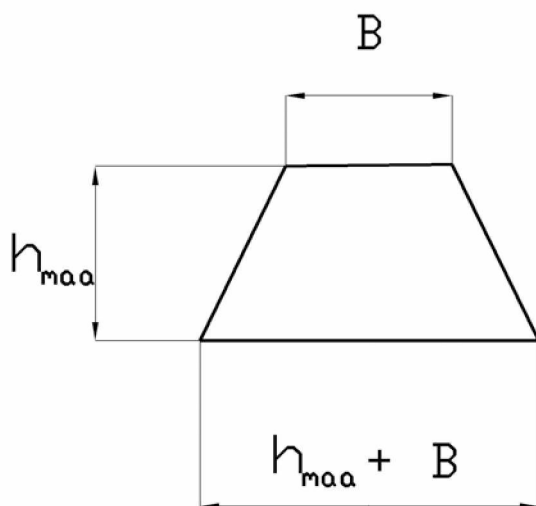
Kuormakaavio LM3 lasketaan tasaisena pinta-alakuormana  $45 \text{ kN/m}^2$  ja kuormakaavio LM3:n sovituskertoimen on jännemitasta riippumatta  $\beta_{Q1} = 0,8$ .

Yksityisteillä kaikki sovituskertoimet ovat aina 0,8, ellei hankekohtaisesti toisin päätetä.

Kuormakaavioihin LM1, LM2 ja LM3 sisältyy dynaaminen lisä. Peitesyvyyden kasvaessa yli 2 metriin dynaaminen lisä voidaan pienentää /2/ kaavojen {3} mukaisella kertoimella  $r_d$  seuraavasti:

$$\begin{aligned} r_d &= 1 & \text{kun } h_{c,red} < 2 \text{ m} \\ r_d &= r_d = 1,1 - 0,05 \cdot h_{c,red} & \text{kun } 2 \text{ m} \leq h_{c,red} \leq 6 \text{ m} \\ r_d &= 0,8 & \text{kun } h_{c,red} > 6 \text{ m} \end{aligned} \quad \{3\}$$

Pyörien kuormituspinnot ovat eurokoodien soveltamisohjeen NCCI 1 /11/ ja standardin SFS-EN 1991-2 /3/ mukaiset. FEM:llä tai vastaavilla menetelmillä laskettaessa kuormien jakautumisen tien poikkisuuntaan voidaan olettaa olevan kuvan 3.1 mukainen.



$B$  = pyörä- tai telikuorman leveys tai rautatiesilloilla ratapölkyn leveys ( $B = 2,6$  m betonipölkylle)

$h_{maa}$  = peitesyvyys tieliikennekuormien kohdalla =  $h_c$

$h_{maa}$  = peitesyvyys pölkyn alapinnasta junakuormien kohdalla

Kuva 3.1 Pyörä- tai muun pintakuorman jakautuminen tien poikkisuunnassa.



### 3.2.3 Rautatiesillat

Rautatiesillat mitoitetaan eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 1 /11/ ja standardin SFS-EN 1991-2 /3/ mukaiselle junakuormalle LM71-35, ellei tilaaja ole toisin ilmoittanut.

Rautatiesilloilla liikennekuorman jakaantumisessa ja ekvivalenttia liikennekuormaa  $p_{traffic}$  laskettaessa peitesyvyytenä käytetään ratapölkkyjen alapinnasta mitattua peitesyvyyttä. Muussa laskennassa kuten esimerkiksi pysyvän kuorman vaikutuksen ja radan liikennekuorman sysäyslisän laskennassa käytetään todellista peittosyvyyttä  $h_{c,red}$ .

Junakuorman dynaaminen suurennuskerroin  $\phi_2$  määritetään eurokoodien soveltamisohjeen NCCI 1 /11/ ja standardin SFS-EN 1991-2 /3/ mukaan käyttäen nimellisen jännemitan arvoa  $L_\phi = D$ .

Rautatiesillat mitoitetaan suurimmalle taivuttavalle momentille ja vastaavalle normaalivoimalle sekä erikseen suurimmalle normaalivoimalle ja vastaavalle taivutusmomentille seuraavia laskentasääntöjä soveltaen:

1. Suurin taivuttava momentti:  
Kuormana on kuormakaavion LM71-35 akselikuormat sysäyslisineen. Pohjapaine  $\sigma_v$  lasketaan akselikuormien keskipisteestä. Mikäli raiteita on useita, pohjapaine  $\sigma_v$  lasketaan määrävän raiteen akselikuormien keskipisteestä.
2. Suurin normaalivoima:  
Silta mitoitetaan kuormakaavioille LM71-35 sysäyslisineen.

Kuormakaavion nauhakuorma voidaan korvata tasaisella pintakuormalla (kuva 3.1), jonka suuruus on

$$q = \frac{120 \text{ kN/m}}{B + h_r} \quad \{4\}$$

Kuormakaavion akselikuormat voidaan korvata tasaisella ekvivalentilla pintakuormalla, jonka suuruus on

$$q' = \frac{111 \text{ kN/m}}{B + h_r} \quad \{5\}$$

Kuormat  $q$  ja vaikutukset  $q'$  lasketaan yhteen. Koska pinta-alakuorma  $q'$  vaikuttaa 6,4 m:n pituudella, sen vaikutus voidaan ottaa huomioon erillisenä ekvivalenttina liikennekuormaa  $p_{traffic}$  samalla tavalla kuin akselikuormat kohdassa 1. Pohjapaine  $\sigma_v'$  lasketaan raiteen keskikohdalta ja sen suuruus on

$$\sigma_v' = 0,48 \cdot \sigma_v \quad \{6\}$$

Mikäli raiteita on useita, muiden kuin määrävän raiteen akselikuormat otetaan huomioon vastaavalla tavalla kuin kohdassa 1. Mikäli usean raiteen kuvan 3.1 mukaiset kuormitusalueet peittävät toisensa siten, että niiden koko-

naisvaikutus suurenee, pintakuorma  $q$  lasketaan yhteenlasketun arvon mukaan.

### 3.2.4 Kevyen liikenteen sillat

Kevyen liikenteen kuormina käytetään soveltamisohjeen NCCI 1 /11/ mukaista tasaisesti jakautunutta tungoskuormaa  $5 \text{ kN/m}^2$  ja standardin EN 1991-2 kuvan 5.2 mukaista 12 tonnin huoltoajoneuvoa, ellei hankekohtaisesti toisin päätetä. Tungoskuorma ja huoltoajoneuvo eivät sijaitse sillalla yhtä aikaa. Mikäli ajoneuvojen pääsyä sillalle ei ole estetty, mitoitetaan kevyenliikenteen silta kuten yksityistien silta.

### 3.2.5 Ekvivalentti viivakuorma

Mitoitettaessa teräspanktsilta ruotsalaisen käsikirjan /2/ mukaan kuormasta syntyvä pohjapaine  $\sigma_v$  akselikuormista syvyydellä  $z$  lasketaan Boussinesqin kaavalla ja muutetaan sen jälkeen ekvivalentiksi viivakuormaksi syvyydellä  $z = h_{c,red}$  kaavan {7} mukaan.

$$p_{traffic} = \pi \cdot h_{c,red} \cdot \frac{\sigma_v}{2} \quad \{7\}$$

Ekvivalentti viivakuorma ei kuvaa todellista liikennekuormaa vaan se on laskennallinen tietä vastaan kohtisuora viivakuorma  $[\text{kN/m}]$ , jota käytetään putksilta tulevien normaalivoimien ja taivutusmomenttien laskentaan ruotsalaisen käsikirjan /2/ mukaisesti.

Akselikuormien kanssa samanaikainen tasainen pintakuorma  $\alpha_{q1} \cdot q_{ik}$  otetaan erikseen huomioon sellaisenaan.

Kuvassa 3.2 on valmiiksi laskettu ekvivalentti viivakuorma  $p_{traffic}$  tavanomaisille kuormitustapauksille, jotka ovat:

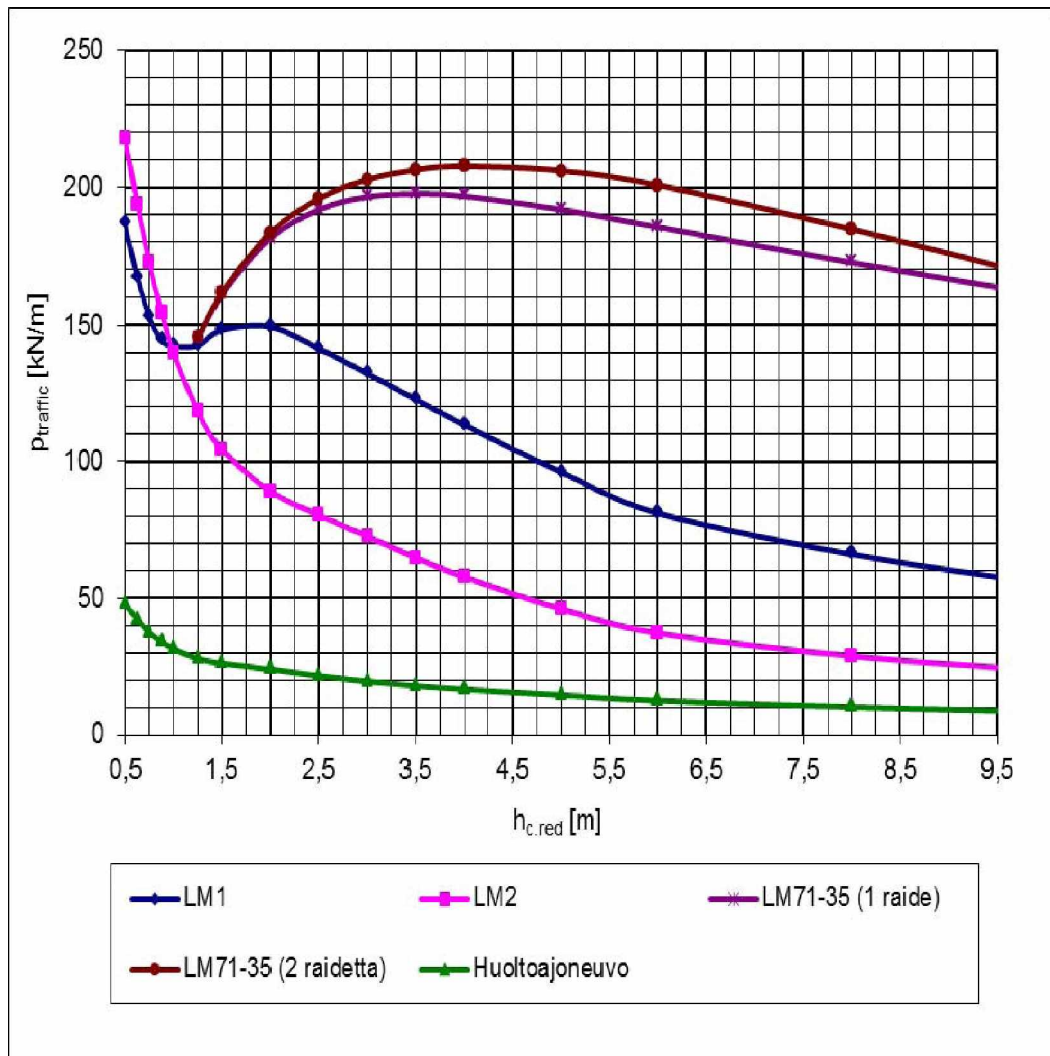
1. Kuormakaavion LM1:n /11/ akselikuormat  $2 \cdot 300 \text{ kN}$  määrävällä kaistalla sekä  $2 \cdot 200 \text{ kN}$  viereisellä kaistalla.
2. Kuormakaavion LM2:n /11/ akselikuorma  $400 \text{ kN}$  yhdellä kaistalla.
3. Kuormakaavion LM71-35 /11/ akselikuormat yhdeltä raiteelta ilman sysäyslisää.
4. Kuormakaavion LM71-35 /11/ akselikuormat kahdelta raiteelta ilman sysäyslisää. Raiteiden keskiöetäisyys on  $4,5 \text{ m}$ .
5. Huoltoajoneuvo, eurokoodien soveltamisohjeen /11/ mukainen kevyenliikenteenväylän huoltoajoneuvo.

Kuvan 3.2 käyrissä ei ole otettu huomioon kaavojen {2} mukaisia sovituskertoimien ( $\alpha_i$  ja  $\beta_i$ ) vähennyksiä kuorman  $p_{traffic}$  intensiteetissä.

Kaavan {3} mukainen dynaamisen lisän pienennys on otettu huomioon kuormakaavioiden LM1 ja LM2 käyrissä kuvassa 3.2.

Kuormakaavion LM1 tasainen pinta-alakuorma  $9,0 \text{ kN/m}^2$  on otettava huomioon kuvasta 3.2 saatavan ekvivalentin viivakuorman lisäksi.

Junakuorman dynaamisen suurennuskertoimen  $\phi_2$  aiheuttama lisä lisätään kuvasta 3.2 saatuihin arvoihin.



Kuva 3.2 Ekvivalentti viivakuorma

## 3.3 Väsyttävät kuormat

Kevyen liikenteen silloille ei tarvitse tehdä väsymismitoitusta.

### 3.3.1 Tiesillat

Jännemitaltaan korkeintaan 8 metristen tiesiltojen väsymismitoitusta perustuu väsytytkuormakaavioon FLM4. Tiesillat, joiden jännemitta on enemmän kuin 8 metriä, mitoitetaan väsytytkuormakaavioille FLM3. Kaikki tiesillat voidaan mitoitaa väsytytkuormakaavioilla FLM1, mutta useimmissa tapauksissa se on liian ankara.

### 3.3.2 Rautatiesillat

Rautatiesiltojen väsytytkuormat lasketaan kuormakaavio LM71 ominaisarvoilla huomioiden dynaaminen suurennuskerroin  $\Phi_2$ .

## 3.4 Osavarmuusluvut

Maaparametreja laskettaessa osavarmuusluvut ovat:

- $\gamma_{n.geo} = 1.0$ , geotekninen kantavuus
- $\gamma_{m.\varphi} = 1.0$ , kitkakulma
- $\gamma_{m.E} = 1.0$ , tangettimoduuli
- $\gamma_{m.surr} = 1.0$ , sivutäytön tilavuuspaino
- $\gamma_{n.cover} = 1.0$ , yläpuolisen täytön tilavuuspaino

Kuormien ja materiaalien osavarmuuskertoimet on koottu taulukkoon 3.2. Kevyen liikenteen silloilla käytetään tiesiltojen osavarmuuskertoimia.

Taulukko 3.2 Varmuuskertoimet

<b>Kuormakertoimet</b>		
Pysyvä kuorma, käyttörajatila	$Y_{gk}$	1
Pysyvä kuorma, murtorajatila	$Y_{gd}$	1,15 tai 0,9
Liikennekuorma, käyttörajatila	$Y_{pk}$	1,0 tai 0
Tiesillan liikennekuorma, murtorajatila	$Y_{pd}$	1,35 tai 0
Tiesillan liikennekuorma, väsytyksrajatila	$Y_{Ff}$	1,0
Raideliikenteen sillan liikennekuorma, murtorajatila	$Y_{pd}$	1,45 tai 0
Raideliikenteen sillan liikennekuorma, väsytyksrajatila	$Y_{Ff}$	1,0
Sovituskertoimet tiesilloille, kuormat LM1 ja LM2, $D = 2-6,0$ m	$\alpha_{qi}, \alpha_{Qi}, \beta_Q$	$0,8 + 0,2 \cdot (D - 2) / 4m$
Sovituskertoimet tiesilloille, kuormat LM1 ja LM2, $D \geq 6,0$ m	$\alpha_{qi}, \alpha_{Qi}, \beta_Q$	1,0
Sovituskertoimet tiesilloille, kuorma LM3	$\beta_{Q1}$	0,8
<b>Geotekniset varmuuskertoimet</b>		
Tilavuuspainot, moduulit, kitkakulmat	$Y_{geo}$	1,0
<b>Teräksen varmuuskertoimet, staattinen kuorma</b>		
Teräksen murtuminen, muokkaamaton poikkileikkaus	$Y_{M0}$	1,0
Teräksen murtuminen, mataloitettu poikkileikkaus	$Y_{M0red}^*$	1,15
<b>Teräksen varmuuskertoimet, väsyttävä kuorma</b>		
Sillat $D = 2-6,0$ m	$Y_{Mf}$	$1,0 + 0,15 \cdot (D - 2) / 4m$
Sillat $D > 6,0$ m	$Y_{Mf}$	1,15
Raideliikenteen sillat, aina	$Y_{Mf}$	1,35
<b>Liitoksen varmuuskertoimet, staattinen kuorma</b>		
Pultin ja yksityiskohtien kestävyys	$Y_{M2}$	1,25
Pultin liukuma	$Y_{M3}$	1,25
Pultin esijännitys	$Y_{M7}$	1,1
<b>Liitoksen varmuuskertoimet, väsyttävä</b>		
Pultin kestävyys, $D = 2-6,0$ m	$Y_{M2f}$	$1,0 + 0,15 \cdot (D - 2) / 4m$
Pultin kestävyys, $D > 6,0$ m	$Y_{M2f}$	1,15
Pultin liukuma	$Y_{M3f}$	1,0
Pultin esijännitys	$Y_{M7f}$	1,0
*) Koskee ainoastaan kierresaumattuja teräsputkia		

## 3.5 Voimasuureet

### 3.5.1 Ruotsalainen mitoitusohje

Maan painon ja liikennekuorman voimasuureet voidaan laskea ruotsalaisen mitoitusohjeen *Design of soil steel composite bridges /2/* tai FEM:n avulla.

Ruotsalaista mitoitusohjetta /2/ voidaan soveltaa kun ylikulkevan väylän pituuskaltevuus on enintään 10 %. Mitoitusohjeen käyttö edellyttää myös, että täyttöjen laajuus, poikkileikkauksen kaarevuussäteiden suhteet, rakenteen jäykkyys jne. täyttävät saman ohjeen vaatimukset.

Ruotsalaisen ohjeen /2/ mukaan putkisilta voidaan sijoittaa joko kaivantoon tai penkereeseen. Kaivantoon sijoitetussa putkisillassa voidaan huomioida ympäröivän maan holvaantumisen tuoma helpotus. Putkisilta voidaan tulkita kaivantoon sijoituksi myös silloin, kun sillan kohdalla on penger edellyttäen, että joku alla olevista ehdoista 1–3 täyttyy:

1. Putken korkeudesta 2/3-osaa on ympäröivän maanpinnan alapuolella.
2. Tie- tai ratapenkereen yläosan leveys on vähintään 2 kertaa suurempi kuin putken suurin vaakamitta  $D$ .
3. Tienpenkereen sivukaltevuus putken kohdalla on vähintään 1:1,75.

Tapauksissa, missä yllä mainitut ehdot eivät täyty, sillan päällä olevan maan holvivaikutusta ei oteta huomioon mitoituksessa ( $S_{ar}=1$ , ruotsalainen käsikirja /2/ kaava (4.9)).

Kehämäisen "Box culvert" tyyppisten ja muiden laakeiden teräsputkisiltojen (laen ja nurkan säteiden suhde on yli 4) mitoituksessa holvivaikutusta ei saa huomioida ( $S_{ar}=1$ ).

Täyttötyötä tehtäessä putken laki nousee ja se pienentää tehollista peittosyvyyttä, mikä pitää ottaa huomioon laskelmissa. Laen nousun suuruus on laskettava ja merkittävä suunnitelmapiirustuksiin arviona täyttötyön aikaisesta laen noususta.

### 3.5.2 FEM

Putkisiltojen kantavuutta laskettaessa FEM:llä tai vastaavilla menetelmillä laskenta voidaan suorittaa tasotapauksena, jolloin kuormien jakautuminen tien poikkisuuntaan voidaan olettaa olevan kuvan 3.1 mukainen. FEM menetelmiä on käytettävä harkiten, koska teräsputken ja maan yhteistoiminnan oikeanlainen mallintaminen voi olla haasteellista.

FEM menetelmän käyttö siltojen mitoituksessa tulee kysymykseen vain tapauskohtaisesti. Tällöin on sovittava tilaajan kanssa mm.,

- Millä testeillä laskentamenetelmän sopivuus maan ja teräksen yhteistoiminnalle varmistetaan.
- Mitä maaparametreja ja osavarmuuskertoimia tulee käyttää käyttö- ja murto-rajatilassa.
- Tuleeko laskennan ja työsuorituksen varmistamiseksi tehdä siltojen koe-kuormituksia todellisen kantavuuden varmentamiseksi.

### 3.5.3 Normaalivoima

Normaalivoiman oletetaan vaikuttavan samansuuruisena koko putken kehällä.

### 3.5.4 Momentti

Mitoittava oman painon momentti putken laessa kehittyy kolmessa vaiheessa:

- Kun täyttötyö saavuttaa putken laen, putken katossa on työnaikainen negatiivinen momentti suurimmillaan.
- Kun täyttötyö on valmis, putken laessa on täysi pysyvien kuormien aiheuttama momentti. Momentti on pienillä täyttösyvyyksillä negatiivinen, muuten positiivinen.
- Kun täyttötyö on valmis ja putkea kuormittaa liikennekuorma, putken laen momentti on täysin kehittynyt.

Putkille, joissa säteiden suhde  $R_t/R_s \geq 1$ , voidaan putken sivualueella vaikuttava momentti laskea seuraavilla ohjeilla:

- Omanpainon aiheuttama momentti on  $-2/3$  kertaa putken laessa vaikuttava momentti.
- Liikennekuorman aiheuttama momentti on  $-1/3$  kertaa putken laessa vaikuttava momentti.

Putken sivualueeksi luetaan sillan poikkileikkauksessa se alue, joka sijaitsee nurkan kaarrelevyn  $R_s$  alueella tai sen alapuolella ja vähintään putken  $D/2$  leveän keskialueen ulkopuolelle, ohje /2/ kuvat 1.3A-G.

Negatiiviseen suuntaan vaikuttava liikennekuormien momentti on  $-1/2$  kertaa määrävään suuntaan (positiivinen) vaikuttava momentti.

## 3.6 Geotekniikka

Teräsputkisillan geotekninen mitoitus tehdään eurokoodin soveltamisohjeen *Geotekninen suunnittelu - NCCI 7 /10/* mukaan niin, että ne täyttävät standardin SFS-EN 1997-1 /8/ ja sen kansallisen liitteen (LVM) vaatimukset.

Perusmaan painumille on asetettu rajat kohdassa 5.4.2.

## 3.7 Putki

### 3.7.1 Staattinen mitoitus

Teräsputkisillan teräsrakenne mitoitetaan käyttö- ja murtorajatilassa eurokoodien SFS-EN 1993-1-1 /4/, SFS-EN 1993-2 + AC /7/, SFS-EN 1993-1-8 /5/ ja SFS-EN 1993-1-9 /6/ mukaisesti. Teräsjännitykset eivät saa käyttörajatilassa ylittää teräksen myötörajan pysyvien ja liikennekuorman ominaiskuormilla.

Teräsputkisillan tulee murtorajatilassa olla niin kestävä, ettei rakenne murtumisen, myötäämisen tai lommahtamisen takia menetä kantavuuttaan



Poikkileikkauksen paikallinen lommahtaminen lasketaan ruotsalaisen ohjeen /2/ liitteen 1 mukaan. Mikäli putkiprofiili on pienen taivutussäteen vuoksi aallotettu myös poikittain, myötömomentti on ruotsalaisen ohjeen /2/ mukaisesti rajoitettava 60 % aallottamattomasta arvosta. Samansuuruinen vähennys on tehtävä myös rakenteen taivutusjäykkyydestä. Tämä koskee vain yli 5 mm:n paksuisia levyjä. Alle 5 mm:n paksuisissa levyissä taivutuskapasiteetin pienennys on laskettava erikseen.

Teräsputkisillan lakipiste on kaaren nurjahduksen estämiseksi tarkistettava epälineaarisesti käyttäytyvälle yhdistetylle normaalivoimalle ja momentille. Tarkistus voidaan tehdä ruotsalaisen käsikirjan /2/ mukaisella kaavalla {8}.

$$\left( \frac{N_d}{N_{cr}} \right)^{\alpha_c} + \frac{M_d}{M_{y,Rd}} \leq 1,0 \quad \{8\}$$

missä

$N_d$	on teräsputkessa vaikuttava normaalivoiman mitoitusarvo [kN/m]
$N_{cr}$	on maahan upotetun teräsputkisillan plastinen nurjahduskestävyys, lasketaan käsikirjan /2/ liitteen 5 mukaan. [kN/m]
$\alpha_c$	on normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutuskerroin
$M_d$	on teräsputkessa vaikuttava taivutusmomentin mitoitusarvo [kN·m/m]
$M_{y,Rd}$	on aallotetun teräsprofiilin plastinen taivutusmomenttikestävyys [kN·m/m]

$$M_{y,Rd} = \eta \cdot W_y \cdot f_{yd} \quad \{9\}$$

missä

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$\alpha_c = \eta^2 \cdot \omega \geq 0,8$$

$$\eta = \frac{Z}{W_y}$$

$\eta$  on plastisen ja elastisen taivutusvastuksen suhde 1,35, ellei muuta arvoa ole osoitettavissa

$$\omega = \frac{N_{cr}}{A_y \cdot f_{yd}} \quad \{10\}$$

$A_y$  on teräsputkisillan kaaren poikkipinta-ala [mm<sup>2</sup>/mm]

Teräsputkisillan kaavan {8} mukainen nurjahduskestävyys on tarkistettava sekä maksimi momentille että vastaavalla normaalivoimalle että maksimi normaalivoimalle kun momentti on = 0.

Teräsputkisillan nurjahtaminen, riittävä jäykkyys asennusaikana ja maanpaineen ylityminen elliptisen sillan alanurkassa tarkistetaan tekemällä ruotsalaisen ohjeen /2/ mukaiset tarkastelut ja varmistamalla, että putkisillan jäykkyysarvot ja poikkileikkausosien taivutussäteiden suhteet sekä rakenteen jäykkyysluvut täyttävät saman ohjeen mukaiset vaatimukset.

### 3.7.2 Tiesillan taipuma

Teräsputkisillan taipuma ei saa tieliikennekuormilla ylittää arvoa  $D/400$ . Taipuma lasketaan käyttäen kuormien tavallista yhdistelmää.

Tieliikenteen kuormilla taipuman voidaan olettaa alittavan edellä mainittu taipumara- ja teräsputkisillalla, jonka laen säde on alle 9 m ja jännemitta alle 12 m ja joka suunnitellaan tämän ohjeen mukaan sekä rakennetaan ohjetta *Teräsputkisillat, Rakentamisen laatuvaatimukset /26/* noudattaen.

Taipuman laskenta voidaan tehdä joko tilaajan hyväksymällä FEM-mallilla tai arvioimalla teräsprofiilin ylä- ja alapinnan jännitysten avulla.

### 3.7.3 Rautatiesillan taipuma

Teräsputkisillan taipuma ei saa raideliikenteen kuormilla liikenteen turvallisuuden takia ylittää arvoa  $D/600$  ja matkustusmukavuuden takia ylittää arvoa  $D/1000$ , kun junan nopeus  $v \leq 200$  km/h ja  $D/1400$ , kun  $v > 200$  km/h. Liikenteen turvallisuuden taipumatarkastelu tehdään käyttäen luokiteltua kuormakaaviota LM71-35 ( $\alpha = 1,46$ ) ja matkustusmukavuuden taipumatarkastelu käyttäen luokittelematonta kuormakaaviota ( $\alpha = 1,00$ ).

Raideliikenteen kuormilla taipumien voidaan olettaa alittavan edellä mainitut taipumarajat teräsputkisillalla, jonka laen säde on alle 6 m ja jännemitta alle 8 m ja joka suunnitellaan tämän ohjeen mukaan sekä rakennetaan ohjetta *Teräsputkisillat, Rakentamisen laatuvaatimukset /26/* noudattaen.

## 3.8 Pulttiliitos

Teräsputkisillan liitokset tulee murtorajatilassa mitoittaa niin kestäviksi, etteivät niiden lujuudet missään kuormatilanteessa ylitä.

Putkisillan valmistajan tulee käyttää liitoksissa ennalta testattuja ja hyväksytyjä erikoispultteja tai tavanomaisia pultteja yhdessä aluslevyjen kanssa, joita on muotoiltu aallotettua teräsprofiilia varten. Pultin kartiomaisen muodon tulee parantaa kosketusta aaltomaista teräspintaa vastaan siten, että liitoksesta tulee tiukka ja kitkavoima kasvaa pienestäkin liikkeestä. Näillä erikoispulteilla tulee olla sama murto- ja väsymisluku kuin eurokoodien SFS-EN 1993-1-8 /5/ vastaavilla pulteilla.

Pulttien, muttereiden ja aluslevyjen tulee täyttää eurokoodien SFS-EN 1993-1-8 /5/ kohdassa 1.2.1 ryhmässä 4 mainittujen viitestandardien EN 1090 /25/ vaatimukset. Liitokset valmistetaan liukumattomiksi eurokoodin SFS-EN 1993-1-8 /5/ kohdan 3.4.1 kiinnitysluokan B tai C mukaisiksi kiristämällä pultit vähintään InfraRyl taulukossa 42040:T2 /13/ mainittuun esijännitysvoimaan. Putkisillan valmistajan tulee ennakkokokein varmistaa millä kiristysvoimalla ja menettelyllä oikea esijännitysvoima saavutetaan.

Pultin laskennallinen vetolujuus lasketaan eurokoodin SFS-EN 1993-1-8 /5/ mukaisti, jakamalla vetomurtolujuus  $f_{ub}$  tämän ohjeen taulukossa 3.2 annettulla osavarmuuskertoimella  $\gamma_{M2}$ . Pultin laskennallinen leikkauslujuus on em. laskennallinen vetolujuus kerrottuna kertoimella 0,6.

Kun pultissa vaikuttaa samanaikaisesti leikkaus- ja vetovoima, yhteisvaikutus tarkistetaan kaavalla {11}.

$$\frac{F_{v.Ed}}{F_{v.Rd}} + \frac{F_{t.Ed}}{1,4 \cdot F_{t.Rd}} \leq 1,0 \quad \{11\}$$

missä

$$F_{v.Rd} = \frac{0,6 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{Y_{M2}} \quad \{12\}$$

$$F_{t.Rd} = \frac{A_s \cdot f_{ub}}{Y_{M2}} \quad \{13\}$$

$F_{v.Ed}$  on pultille kuormien kautta tuleva leikkausvoima [kN]

$F_{t.Ed}$  on pultille kuormien kautta tuleva vetovoima [kN]

$A_s$  on pultin jännityspoikkipinta-ala, yleensä  $0,78 \cdot A$ .

Pulttien leikkauskestävyyttä alennetaan kertomalla luvulla 0,85 mikäli pulttinreikä tehdään standardiarvoja /5/ suuremmalla väljyydellä.

Pulttireikien reunaetäisyydet ja keskiöväliä tulee olla eurokoodien SFS-EN 1993-1-9 /6/ väsyttävien kuormien asettamien vaatimusten mukaiset, eli reunaetäisyyksien ( $e_1$  ja  $e_2$ ) tulee olla vähintään  $1,5 \cdot d$  ja keskiövälien ( $p_1$  ja  $p_2$ ) vähintään  $2,5 \cdot d$ . Luku  $d$  on pultin nimellishalkaisija.

Pultin reikiä ei tarvitse ottaa huomioon profiilin taivutus- tai vetolujuutta alentavina heikennyksinä kun:

$$\frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{Y_{M2}} \geq \frac{A_y \cdot f_y}{Y_{M0}} \quad \{14\}$$

missä

$A_y$  on poikkileikkauksen rei'ittämätön pinta-ala [mm<sup>2</sup>/mm]

$A_{net}$  on poikkileikkauksen rei'itetty pinta-ala [mm<sup>2</sup>/mm]

$f_u$  on levyteräksen vetomurtolujuus [MPa]

Pultin leikkauskestävyyttä tulee tarkistaa reunapuristuskestävyydelle kun pultille tuleva leikkausvoima ylittää kitka-arvon. Reunapuristuskestävyys lasketaan kaavalla {19}.

$$F_{b.Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t_y}{Y_{M2}} \quad \{15\}$$

missä

$d$  on pultin halkaisija [mm]

$t_y$	on levyteräksen ainevahvuus [mm]	
$k_1$	on reunapulteille	$2,8 \cdot \frac{e_2}{d_o} - 1,7 \leq 2,5$
	on muille pulteille	$1,4 \cdot \frac{p_2}{d_o} - 1,7 \leq 2,5$

missä  $e_2$  [mm] on reunimmaisten pulttien keskiön reunaetäisyys ja  $p_2$  [mm] rinnakkaisten pulttien keskiöetäisyys kohtisuoraan voimaa vastaan ja  $d_o$  [mm] pultin reiän halkaisija.

$\alpha_b$	on pienin arvoista	$\alpha_d ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; 1$
------------	--------------------	-------------------------------------

missä

$\alpha_d$	on reunapultille	$\frac{e_1}{3 \cdot d_o}$
	on muille pulteille	$\frac{p_1}{3 \cdot d_o} - \frac{1}{4}$

missä  $e_1$  [mm] on pulttien keskiön etäisyys levyn päädyistä ja  $p_1$  [mm] pulttien keskiöetäisyys voiman suunnassa.

Kun pultin leikkausvoiman suunta on levyn reunasta poispäin, reunakestävyys lasketaan kaavan {19} mukaan käyttäen  $\alpha_b$ :n arvoa 1.

Reunapuristuslujuutta alennetaan kertomalla luvulla 0,8, mikäli pultinreikä tehdään standardiarvoja /5/ suuremmalla väljyydellä. Sama vähennys tehdään kun pultin kanta ja mutteri ovat kartiomaisia riippumatta pultin reiän koosta. Kartiomaisia pultin kantoja ja muttereita käytettäessä levynpaksuudesta ei tehdä vähennyksiä.

Kartiomaisia pultin kantoja ja muttereita käytettäessä pultteihin kohdistuvasta leikkausvoimasta voidaan vähentää kitkavoima ja mitoittaa liitos reunapuristukselle siltä osin kun leikkausvoima ylittää saumaan tulevan kitkavoiman. Yhden pultin kitkavoima lasketaan eurokoodin SFS-EN 1993-1-8 /5/ kaavaa (3.8b) soveltaen kaavalla {16}.

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot \mu \cdot \left( \frac{F_{p,C}}{\gamma_{M7}} - 0,8 \cdot F_{t,Ed} \right)}{\gamma_{M3}} \quad \{16\}$$

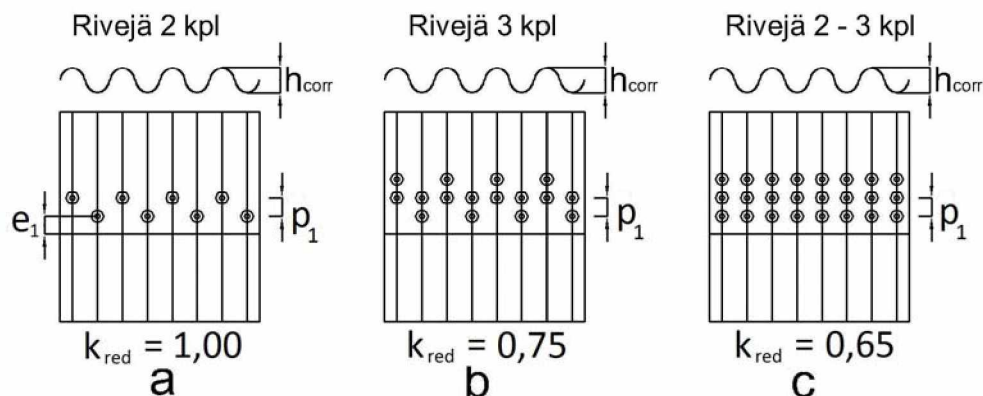
missä

$\mu = 0,3$	
$k_s = 1$	kun pultinreikä on standardin mukainen tai kun pultinreikä on jonkin verran ylisuurena sovitettu kartiomaisen pultin kannan ja mutterin mukaan, muussa tapauksessa sovelletaan eurokoodin SFS-EN 1993-1-8 taulukkoa 3.6 /5/
$F_{p,C}$	on pultille tuleva esijännitysvoima [kN]
$F_{t,Ed}$	on pultin samanaikainen vetovoima [kN]
$\gamma_{M7}$ ja $\gamma_{M3}$	ovat taulukosta 3.2 saatavia osavarmuuslukuja.

Pultin vetokestävyys lasketaan SFS-EN 1993-1-8 taulukon 3.4 /5/ mukaan käyttäen  $k_2$  arvoa 0,6 mikäli pultin kanta ja mutteri ovat kartiomaisia. Pultin läpileikkautumislujutta laskettaessa mutterin ja pultin kannan halkaisijaksi  $d_m$  valitaan mutterin tai pultin kannan ulkohalkaisija.

Pultin mitoituksessa tulee lisäksi ottaa huomioon seuraavaa:

- Pultin kestävyys sekä veto- että leikkausrasituksessa lasketaan pultin jännityspoikkipinta-alan mukaan, joka yleensä on  $A_s = 0,78 \cdot A_n$ , missä  $A_n$  on pultin varren nettopoikkipinta-ala
- Reiän koko saa olla enintään 4 mm pultin nimellishalkaisijaa suurempi
- Pultin koko on vähintään M20
- Pultin kannat ja mutterit ovat niin muotoiltuja, ettei murtumista tapahdu pultin tai levyteräksen kosketuspinnassa kun pulttia vedetään murtolujuuteen saakka reikää vasten, jonka suuruus on vähintään 4 mm pultin nimellishalkaisijaa suurempi
- Pultin kannat ja mutterit ovat niin kestäviä, että murtuminen sekä veto- että väsymistestissä tapahtuu aina pultin varren eikä pultin kannan tai mutterin kohdalta; testausolosuhteiden tulee vastata putkisillan päittäisliitosta
- Levyjen päittäisliitoksessa pultit sijoitetaan yleensä kahteen riviin siten, että pultteja on yksi pultti jokaisen aallon harjalla ja pohjassa vuorotellen, kuva 4.1 a
- Mikäli levyjen päittäisliitos edellyttää pulttien lisäämistä, pultteja tulee sijoittaa kuvan 3.3 b tai 3.3 c mukaan, jolloin liitoksen lujuutta on kuvan 3.3 b tapauksessa alennettava kertomalla lujuusarvot luvulla 0,75 ja kuvan 3.3 c tapauksessa luvulla 0,65.
- Mitan  $p_1$  on oltava vähintään 50 mm ja enintään 150 mm (kuva 3.3)
- Pulttiliitos mitoitetaan yksileikkeisenä.



Kuva 3.3 Levyjatkoksen rei'itys

Levyjen aallon harjan suunnassa levyjen limityksen tulee olla vähintään puolen aallon pituinen. Limityskohtaan tulevien pulttien välinen etäisyys saa olla enintään:

- 250 mm, kun yksittäisen profiilin korkeus ( $h_p$ ) on  $50 \text{ mm} \leq h_p \leq 60 \text{ mm}$
- 350 mm, kun yksittäisen profiilin korkeus ( $h_p$ ) on  $60 \text{ mm} < h_p < 110 \text{ mm}$
- 450 mm, kun yksittäisen profiilin korkeus ( $h_p$ ) on  $110 \text{ mm} \leq h_p \leq 160 \text{ mm}$

Mikäli pulttiliitos on rakenteellisesti suunniteltu siten, että liitettävät levyt eivät asetu tiiviisti toisiaan vasten, pultin leikkauslujuutta ei oteta huomioon (kuva 3.4). Suurimpana sallittuna rakona levyjen välissä pidetään pultin varren nimellishalkaisijan yhtä kymmenesosaa.



Kuva 3.4 Pultti, jolla ei ole leikkauslujuutta

### 3.9 Laen ja nurkkien vahvistaminen

Tätä ohjetta voidaan yhdessä ruotsalaisen käsikirjan /2/ kanssa soveltaa monilevyrakenteisten teräsputkisiltojen vahvistamiseen seuraavin ehdoin:

- Teräsrakenteen vahvistus muodostuu kehän lakialueella ja tarvittaessa myös kehän nurkka-alueelle profiilin päälle kiinnitetyistä ylimääräisistä levyistä
- Lakialueen vahvikelevyt on asennettu kehän keskipisteen suhteen symmetrisesti ja niiden pituus on vähintään  $0,5 \cdot L_d$
- Mahdolliset vahvikelevyt nurkkiin peittävät kehän kaarevan nurkkaosan ( $R_s$ ) kokonaan
- Vahvikelevyt peittävät sillan sivusuunnassa vähintään 50 % kehän pintalasta ja vahvikelevyjen keskinäinen etäisyys on enintään 750 mm
- Teräksisen kehärakenteen korkeus  $h$  suhteessa kehärakenteen vaakasuoran osan pituuteen  $L_d$  on enintään 0,35
- Voimasuureita laskettaessa maan ja teräsrakenteen kaavan (4.p) /2/ jäykkyysuhdetta  $\lambda_f$  on reducedoitu kaavan {17} mukaan
- Teräsputkisillan nurjahduskuormaa laskettaessa profiilin jäyhyysmomenttina käytetään arvoa  $I_y = \lambda_{Nred} \cdot 0,5 \cdot I_{rf}$ , missä  $\lambda_{Nred}$  on kuvan 3.5 mukainen kerroin
- Vahvistukseen sijoitetaan pultteja vastakkain tulevien aaltojen kohdalle ja ne mitoitetetaan murtorajatilassa kaavojen {18} ja {19} mukaisille leikkausvoimille ja tarkistetaan kaavojen {20} ja {21} mukaiselle väsytykestävyydelle.
- Pulttien koon tulee olla vähintään M20 ja pulttien jakovälin putken suunnassa enintään 600 mm ja sillan suunnassa enintään
  - 250 mm, kun yksittäisen profiilin korkeus ( $h_p$ ) on  $50 \text{ mm} \leq h_p \leq 60 \text{ mm}$
  - 350 mm, kun yksittäisen profiilin korkeus ( $h_p$ ) on  $60 \text{ mm} < h_p < 110 \text{ mm}$
  - 450 mm, kun yksittäisen profiilin korkeus ( $h_p$ ) on  $110 \text{ mm} \leq h_p \leq 160 \text{ mm}$

Kaavan {18} leikkausvoimaa vastaavat pultit voidaan jakaa tasan koko vahvikelevyn alueelle tai vaihtoehtoisesti siten, että kaavojen {18} ja {19} termien  $N_d$  vastaavat pul-

tit sijoitetaan kokonaan tai osittain levyjen molempiin päihin. Levyn päihin tulevien pulttien lukumäärän tulee olla sama molemmissa päissä.

Vahvikelevyjen kokonaispulttimäärässä on huomioitava myös vahvistamattoman rakenteen staattisen mitoituksen mukainen pulttimäärä.

Maanpainosta aiheutuvan normaalivoiman laskennassa kaavan (4.c) /2/ termissä

$$0,2 \cdot \frac{H}{D} \cdot p_1 \cdot D^2, D \text{ korvataan arvolla } 2 \cdot R_s.$$

missä

$R_s$  on putken nurkan säde [m]

$$\lambda_{fred} = \lambda_f \cdot \frac{\delta_{rf}}{\delta_{urf}} \quad \{17\}$$

missä

$\lambda_f$  on vahvistamattoman teräsputkisillan maan ja teräsrakenteen jäykkyyssuhdetta kuvaava luku, /2/ kaava (4.p).

$\lambda_{fred}$  on vahvistetun teräsputkisillan redusoitu maan ja teräsrakenteen jäykkyyssuhdetta kuvaava luku.

$\delta_{urf}$  on vahvistamattoman ja vapaasti seisovan teräsrakenteen taipuma jänteen keskellä yksikkökuormasta.

$\delta_{rf}$  on vahvistetun ja vapaasti seisovan teräsrakenteen taipuma jänteen keskellä yksikkökuormasta, kun vahvistetulla osalla oletetaan olevan täysi liittävaikutus.

Kuvassa 3.5

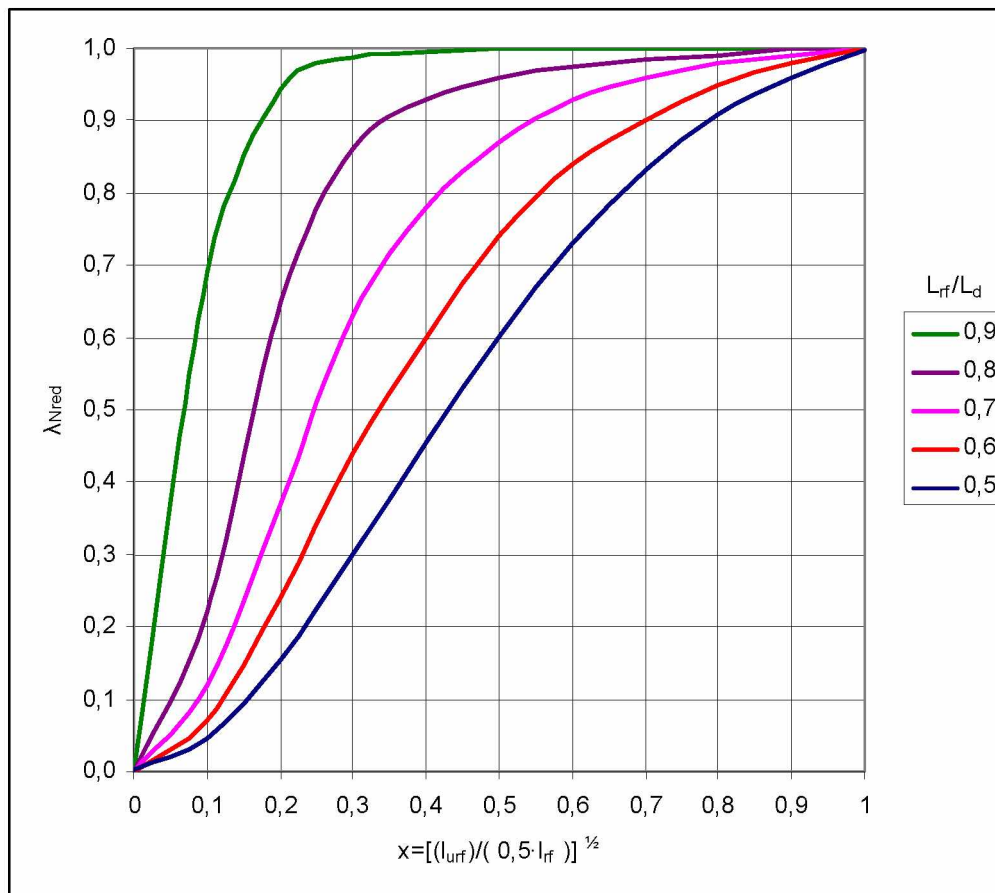
$$x \text{ on } \sqrt{I_{urf} / 0,5 \cdot I_{rf}}$$

$I_{urf}$  on vahvistamattoman teräsprofiilin jäyhyysmomentti [mm<sup>4</sup>/mm]

$I_{rf}$  on vahvistetun teräsprofiilin jäyhyysmomentti [mm<sup>4</sup>/mm]

$L_{rf}$  lakialueen vahvikelevyn pituus [m]

$L_d$  on terässillan nurkkien välinen vaakasuora etäisyys [m]



Kuva 3.5 Vahvistetun "Box culvert" sillan jäyhyysmomentin reduktiokerroin  $\lambda_{Nred}$ .

Laen vahvikelevyn pulteille tuleva leikkausvoima lasketaan kaavasta {18} ja nurkan vahvikelevyn pulteille tuleva leikkausvoima kaavasta {19}.

$$V_{db} = \frac{8 \cdot \frac{|M_d|}{d_{tot}} + |N_d|}{L_d} \quad \{18\}$$

missä

$V_{db}$	on laen vahvikelevyn pulteille tuleva leikkausvoima [kN/m <sup>2</sup> ]
$M_d$	on lakipisteen mitoittava taivutusmomentti [kN·m/m]
$N_d$	on sillan mitoittava normaalivoima [kN/m]
$d_{tot}$	on teräsrakenteen yhteenlaskettu korkeus [m]
$L_d$	on terässillan nurkkien välinen vaakasuora etäisyys [m]

$$V_{db,nurkka} = \frac{8 \cdot \left[ \frac{2}{3} \cdot M_{dj} + \frac{1}{3} \cdot M_{dt} \right] \frac{1}{d_{tot}} + |N_d|}{L_{Rs}} \quad \{19\}$$

missä

$V_{db,nurkka}$	on nurkan vahvikelevyn pulteille tuleva leikkausvoima [kN/m <sup>2</sup> ]
$M_{dj}$	on lakipisteen murtorajatilan laskennallinen taivutusmomentti [kN·m/m] maan painosta



$M_{dt}$	on lakipisteen murtorajatilan laskennallinen taivutusmomentti [kN·m/m] liikennekuormasta
$N_d$	on sillan mitoittava normaalivoima [kN/m]
$d_{tot}$	on teräsrakenteen yhteenlaskettu korkeus [m]
$L_{Rs}$	on terässillan nurkkalevyn pituus [m] kaaren suunnassa mitattuna

Vahvistuksien pulttiliitos tarkistetaan kaavojen {20} ja {21} mukaisille väsyttävälle leikkauskuormille.

$$V_{fat} = \frac{8 \cdot |M_t|}{d_{tot} \cdot L_d} \quad \{20\}$$

$$V_{fat.nurkka} = \frac{8 \cdot \left| \frac{1}{3} \cdot M_t \right|}{d_{tot} \cdot L_{Rs}} \quad \{21\}$$

missä

$M_t$  on liikennekuorman aiheuttama momentti [kN·m/m]

## 3.10 Putken väsymiskestävyys

### 3.10.1 Yleistä

Teräsputkisillat mitoitetaan rakenteen väsymiselle eurokoodien SFS-EN 1993-1-9 /6/ ja SFS-EN 1993-2 /7/, eurokoodin soveltamisohjeen *Siltojen kuormat ja suunnittelupe-rusteet – NCCI 1 /11/* sekä tässä ohjeessa annettujen lisäohjeiden mukaan.

Ehjän levyteräksen väsymisluokka on 160 ja rei'itetyn levyn vastaavasti 90. Väsymis-mitoitusta ei tarvitse tehdä rei'itetylle teräkselle kun liitoksessa vaikuttava kitkavoima (kaava {21}) ylittää väsyttävien kuormien aiheuttaman pultin vetovoiman arvon.

$$F_{s,Rf} = \frac{k_s \cdot \mu_f \cdot \left( \frac{F_{p,C}}{Y_{M7f}} - 0,8 \cdot F_{t,Ef} \right)}{Y_{M3f}} \quad \{22\}$$

missä

$\mu_f = 0,4$

$k_s = 1$

kun pultinreikä on standardin mukainen tai kun pultinreikä on jonkin verran ylisuurena sovitettu kartiomaisen pultin kannan ja mutterin mu-kaan, muussa tapauksessa sovelletaan eurokoodin SFS-EN 1993-1-8 taulukkoa 3.6 /5/

$F_{p,C}$  on pultille tuleva esijännitysvoima [kN]

$F_{t,Ef}$  on pultin samanaikainen vetovoima [kN]

$Y_{M3f}$   $Y_{M7f}$  ovat taulukosta 3.2 saatavat osavarmuusluvut

### 3.10.2 Tiesillat

Teräspankikisiltojen, joiden jännemitta on korkeintaan 8 m, väsymismitoitus perustuu väsytytkuormakaavioon FLM4. Tässä ohjeessa esitetty tieliikenteen teräspankikisiltojen väsymismitoitushje perustuu väsytytkuormakaavioon FLM4, mutta laskennan yksinkertaistamiseksi se on muokattu kuormakaavioon LM2 rasituksilla laskettavaan muotoon. Väsytytkuormakaavioon FLM4 suurin yksittäinen jännitysvaihteluväli on 40 % kuormakaavioon LM2 jännitysvaihteluvälistä.

Väsyttävälle kuormille momentin vaihtelu on riippuvainen teräspankikisillan jännemittasta. Väsymismitoitusta varten tieliikennekuorman aiheuttama momentin vaihteluväli lasketaan kaavalla {23a}.

$$\Delta M_{fat} = \left(1,0 + \frac{D - 2 \cdot m}{12 \cdot m}\right) \cdot |M_{LM2}| \quad \text{kun } 2 \text{ m} \leq D \leq 8 \text{ m} \quad \{23a\}$$

$$\Delta M_{fat} = 1,5 \cdot |M_{FLM3}| \quad \text{kun } D > 8 \text{ m} \quad \{23b\}$$

missä

$D$	on teräspankikisillan jännemitta [m]
$M_{LM2}$	on kuormakaavioon LM2 aiheuttama taivutusmomentti teräspankikisillan laella [kN·m/m]
$M_{FLM3}$	on kuormakaavioon FLM3 aiheuttama taivutusmomentti teräspankikisillan laella [kN·m/m]

Tiesilloilla rakenneteräksen väsymiskestävyys tarkistetaan ehdon {24} mukaan, kun Teräspankikisillan jännemitta on alle 8 m ja redusoitu peitesyvyys on alle 1,5 m.

$$\lambda_{\sigma} \cdot \lambda_n \cdot \frac{\Delta \sigma_{LM2}^5}{\Delta \sigma_D^5} \cdot \frac{N}{5 \cdot 10^6} \leq 1,0 \quad \{24\}$$

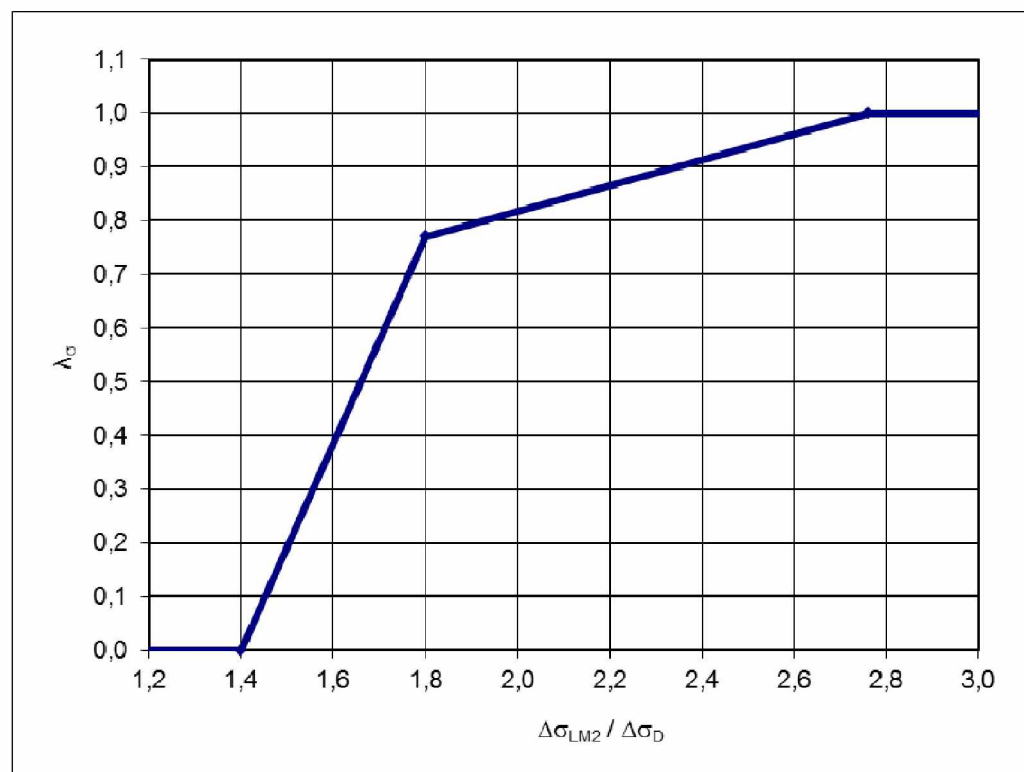
missä

$$\Delta \sigma_D = 0,737 \frac{\Delta \sigma_C}{\gamma_{Mf}}$$

$\Delta \sigma_D$	on vakioamplitudinen väsymisraja [MPa]
$\Delta \sigma_C$	on väsymisluokka [MPa]
$\lambda_{\sigma}$	on väsyttävän kuorman ja väsymisluokan suhteesta riippuva korjauskerroin $0 \leq \lambda_{\sigma} \leq 1,0$ , taulukko 3.3 ja kuva 3.6.
$\lambda_n$	on peittösyvyydestä ja liikennetyypistä riippuva kerroin, kaava {25} ja kuva 3.7.
$\Delta \sigma_{LM2}$	kuormakaavioon LM2 aiheuttama jännitysvaihteluväli [MPa]
$\gamma_{Mf}$	on osavarmuusluku taulukon 3.2 mukaan
$N$	on raskaiden ajoneuvojen kokonaismäärä putkisillalla sen suunnitellunkäyttöiän aikana, NCCI 1 /11/ taulukon B4 liikennemäärä kertaa sillan suunniteltu käyttöikä.

Taulukko 3.3  $\lambda_\sigma$ - ja  $\lambda_\tau$ -kertoimet

Perusaine			
$\frac{\Delta\sigma_{LM2}}{\Delta\sigma_D}$	$\leq 1,4$	1,80	$\geq 2,76$
$\lambda_\sigma$	0	0,77	1,00
Pulttit			
$\frac{\Delta\sigma_{LM2.b}}{\Delta\sigma_{D.b}}$	$\leq 1,4$	1,80	$\geq 2,76$
$\lambda_{\sigma.b}$	0	0,77	1,00
$0,737 \cdot \frac{\Delta\tau_{LM2.b}}{\Delta\tau_{C.b}}$	$\leq 1,4$	1,80	$\geq 2,76$
$\lambda_{\tau.b}$	0	0,77	1,00
$\lambda$ :n väliarvot interpoloidaan			



Kuva 3.6  $\lambda_\sigma$ -kerroin

Kerroin  $\lambda_n$  voidaan laskea kaavoilla {25} tai käyttää kuvaa 3.7.

Kaukoliikenne:

$$\lambda_n = (-3,1166 \cdot x^3 + 13,599 \cdot x^2 - 16,612 \cdot x + 11,531) \cdot 10^{-3} \quad \{25a\}$$

Keskipitkä liikenne:

$$\lambda_n = (-2,9122 \cdot x^3 + 12,932 \cdot x^2 - 15,643 \cdot x + 10,902) \cdot 10^{-3} \quad \{25b\}$$

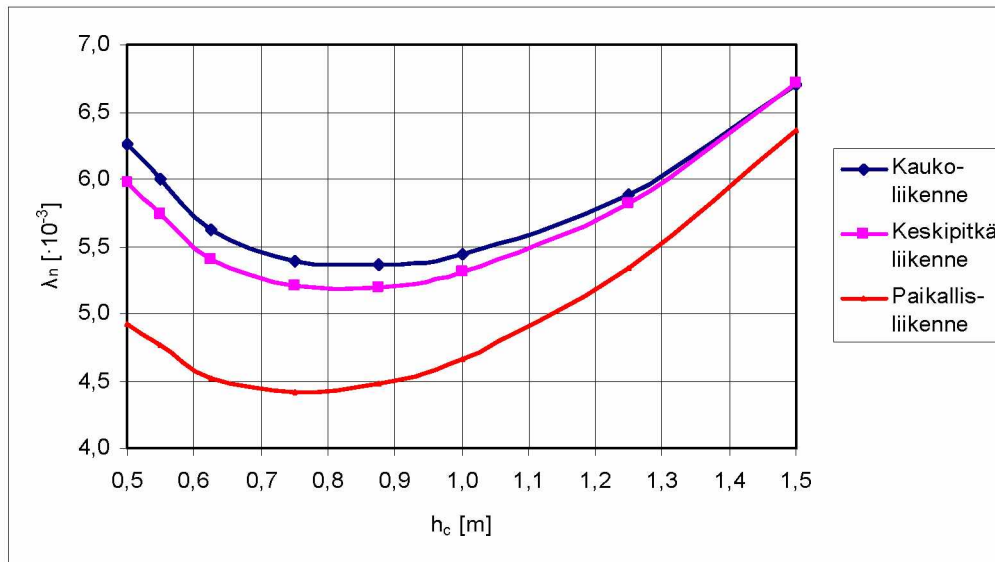
Paikallisliikenne:

$$\lambda_n = (-2,3782 \cdot x^3 + 11,092 \cdot x^2 - 13,008 \cdot x + 8,943) \cdot 10^{-3} \quad \{25c\}$$

missä

$$x = \frac{h_{c,red}}{m}$$

$h_{c,red}$  on teräsputken redusoitu peitesyvyys [m]

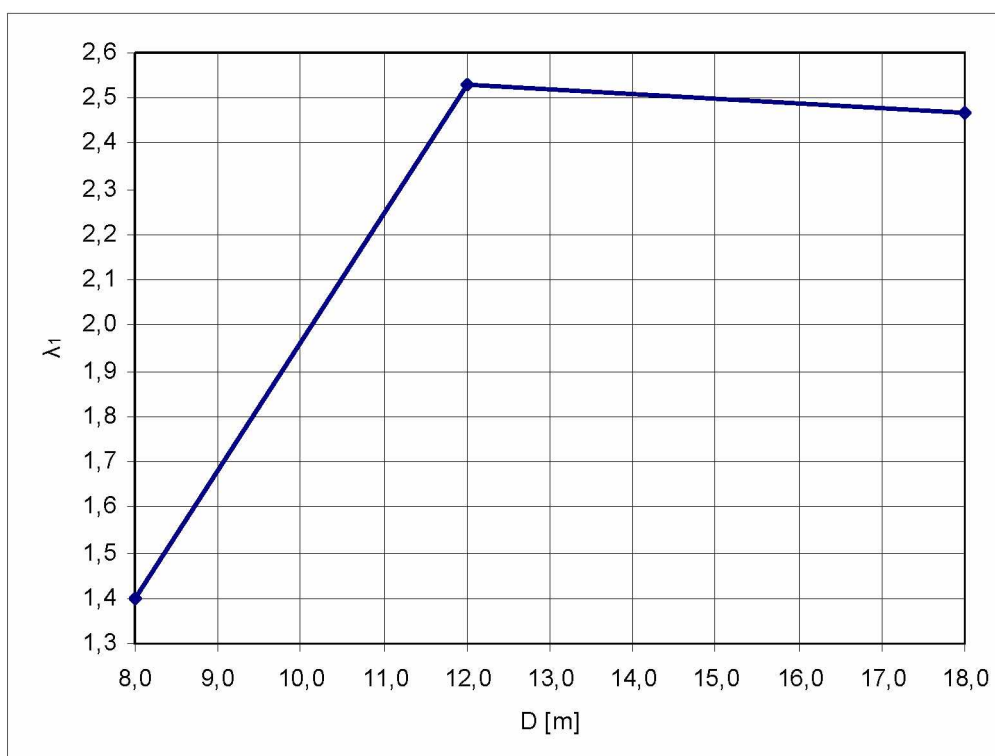


Kuva 3.7  $\lambda_n$ -kerroin

Peitesyvyyden ollessa enemmän kuin 1,5 m, ei tieliikenteen putkisilloille tarvitse tehdä väsymismitoitusta. Väsymismitoitusta tehdään kuitenkin kaikille putkisilloille, joiden jännemitta on enemmän kuin 8 m, eurokoodin soveltamisohjeen *Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet - NCCI 1 /11/* kuormakaaviolle FLM3. Standardin SFS-EN 1993-2 /7/ kertoimelle  $\lambda_1$  käytetään kuvan 3.8 tai taulukon 3.4 mukaista muutettua arvoa.

Taulukko 3.4  $\lambda_1$ -kerroin

D [m]	8,0	12,0	18,0
$\lambda_1$	1,40	2,53	2,47








Kuva 3.8  $\lambda_1$ -kerroin

Tehollinen jännitysvaihteluväli voidaan SFS-EN 1993-1-9 /6/ kuvan 7.4 mukaan määrittää laskemalla yhteen jännitysvaihteluvälin vedetty alue ja 60 % jännitysvaihteluvälin puristetusta alueesta.

Liikennetyyppi on keskipitkä liikenne, ellei tilaaja ole toisin ilmoittanut. Kerroin  $\lambda_n$  perustuu eurokoodien SFS-EN 1991-2 /3/ FLM4 taulukon 4.7 kuormakaavioihin. Ajoneuvotyyppien jakautuminen on kuitenkin modifioitu Suomessa 1998 tehdyn akseli-massatutkimuksen /1/ perusteella kuvan 4.7 mukaiseksi.

Raskaiden ajoneuvojen lukumäärä N lasketaan eurokoodin soveltamisohje *Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1 /11/* taulukon B4 avulla käyttäen siltojen elinikänä suunnittelukäyttöikää ellei tilaajan kanssa ole muuta sovittu.

AJONEUVOTYYPPI			LIIKENTEEN TYPPI			
			Kauko- liikenne	Keskipitkä liikenne	Paikallis- liikenne	
KUORMA-AUTO	Akselivälit [m]	Ekvivalentit akseli- kuormat [kN]	Kuorma-autojen osuus			Pyörä- tyyppi
	4.50	70 130	15,0	20,0	35,0	A B
	4.20 1.30	70 120 120	15,0	20,0	35,0	A B B
	3.20 5.00 1.30 1.30	70 150 90 90 90	10,0	10,0	5,0	A B C C C
	3.40 6.00 1.80	70 140 90 90	10,0	10,0	5,0	A B B B
	4.80 3.60 4.40 1.30	70 130 90 80 80	50,0	40,0	20,0	A B C C C

Kuva 3.9 Raskaiden ajoneuvojen jakauma

### 3.10.3 Rautatiesillat

Rautatiesiltojen väsymiskestävyyden laskelmissa käytetään standardin SFS-EN 1993-2 /7/ taulukon 9.4 sekaliikennetyyppiä 25 t Mix. Vaikutusviivan pituutena käytetään teräspuiskun jännemittaa  $D$ .

Väsymismitoitusta varten raideliikenteen aiheuttama momentin vaihteluväli laske-  
taan kaavalla {26}.

$$\Delta M_{fat} = 1,5 \cdot |M_{LM71}| \quad \{26\}$$

missä

$M_{LM71}$  on kuormakaavion LM71 ominaisarvon ( $\alpha = 1,00$ ) aiheuttama taivutusmomentti teräspuiskun laella dynaaminen suurennuskerroin  $\Phi_2$  huomioituna.

## 3.11 Liitosten väsymiskestävyys

### 3.11.1 Yleistä

Teräspuiskisillan liitokset mitoitetaan rakenteen väsymiselle eurokoodien SFS-EN 1993-1-9 /6/ ja SFS-EN 1993-2 /7/, eurokoodin soveltamisohjeen *Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1 /11/* sekä tässä ohjeessa annettujen lisäohjeiden mukaan.

Pultin väsymisluokka on leikkaukselle mitoitettaessa 100 ja vedolle mitoitettaessa standardin SFS-EN 1993-1-9 /6/ arvosta poiketen 80.

Väsymismitoitusta ei tarvitse tehdä pultin leikkaukselle kun liitoksessa vaikuttava kitkavoima väsyttävälle kuormalle ylittää kaavan {22} arvon.

### 3.11.2 Tiesillat

Kartiomaisia pultin kantoja ja muttereita käytettäessä tiesilloilla pultteihin kohdistuvasta väsyttävästä leikkausvoimasta voidaan vähentää kitkavoima ja mitoittaa liitos väsyttävälle leikkausvoimalle siltä osin kun kitkavoima ylittää pulteille tulevan leikkaukslujuuden.

Tiesilloilla pultin väsymiskestävyys vedolle tarkistetaan kaavan {27} ja leikkaukselle tarkistetaan kaavalla {28} mukaan, kun jännemitta on alle 8 m ja redusoitu peitesyvyys on alle 1,5 m.

$$S_1 = \lambda_{\sigma,b} \cdot \lambda_n \cdot \frac{\Delta\sigma_{LM2,b}^5}{\Delta\sigma_{D,b}^5} \cdot \frac{N}{5 \cdot 10^6} \leq 1,0 \quad \{27\}$$

$$T_1 = \lambda_{\tau,b} \cdot \lambda_n \cdot \frac{\Delta\tau_{LM2,b}^5}{\Delta\tau_{C,d,b}^5} \cdot \frac{N}{2 \cdot 10^6} \leq 1,0 \quad \{28\}$$

missä

$$\Delta\sigma_{D,b} = 0,737 \frac{\Delta\sigma_{C,b}}{Y_{Mf}}$$

$$\Delta\tau_{C,d,b} = \frac{\Delta\tau_{C,b}}{Y_{Mf}}$$

$\Delta\sigma_{C,b}$	on väsymisluokka pultin vedolle [MPa]
$\Delta\tau_{C,b}$	on väsymisluokka pultin leikkaukselle [MPa]
$\lambda_{\sigma,b}$	on väsyttävän kuorman ja väsymisluokan suhteesta riippuva korjauskerroin $0 < \lambda_{\sigma,b} < 1,0$ , taulukko 3.3
$\lambda_{\tau,b}$	on väsyttävän kuorman ja väsymiskestävyys suhteesta riippuva korjauskerroin $0 < \lambda_{\tau,b} < 1,0$ , taulukko 3.3
$\lambda_n$	on peittösyvyydestä ja liikennetyypistä riippuva kerroin, kaava {23} tai kuva 3.7.
$\Delta\sigma_{LM2,b}$	on kuormakaavion LM2 aiheuttama pulttien vedon jännitysvaihteluväli [MPa]
$\Delta\tau_{LM2,b}$	on kuormakaavion LM2 aiheuttama pulttien leikkauksen jännitysvaihteluväli [MPa]
$Y_{Mf}$	on osavarmuusluku taulukon 3.2 mukaan
$N$	on raskaiden ajoneuvojen kokonaismäärä putkisillalla sen suunnitellun käyttöikänsä aikana, NCCI 1 /11/ taulukon B4 liikennemäärä kertaa sillan suunniteltu käyttöikä.

Mikäli liitos on mitoitettava samanaikaiselle vedolle ja leikkaukselle tulee kaavan {29} ehdon täyttyä.

$$S_1 + T_1 \leq 1,0 \quad \{29\}$$

Väsymistä laskettaessa muualla kuin putken lakipisteessä taivutusmomentin suurinta arvoa voidaan redusoida peitesyvyyden paksuuden lisääntyessä tai sivupeltien alueella ruotsalaisen ohjeen /2/ mukaisesti. Mikäli pulttiliitos sijaitsee laki- ja sivupellin rajapinnassa, taivutusmomenttina voidaan käyttää alueiden maksimimomenttien itseisarvojen keskiarvoa.

### 3.11.3 Rautatiesillat

Rautatiesilloilla pultin väsymiskestävyys tarkistetaan vedolle, leikkaukselle ja niiden yhteisvaikutukselle.

Rautatiesilloilla ei käytetä liitoksen kitkavoimaa hyväksi väsymisessä.

## 3.12 Käyttöikämitoitus

### 3.12.1 Yleistä

Käyttöikämitoituksella pyritään varmistamaan putken säilyvyys suunnittelukäyttöiän tai erikseen asetetun tavoiteikäkäyttöiän saavuttamiseksi.

Teräspankkin ja sen eri osien käyttöolosuhteet selvitetään ja niiden perusteella määritetään tarvittavat lisäsuojaukstoimenpiteet, joilla tavoitteena oleva käyttöikä saavutetaan. Selvityksessä käytetään hyväksi olosuhdeluokitusta ja mitoitus tehdään kohdan 3.12.6 mukaisesti. Menettelyn avulla lasketut käyttöiät eivät ole tarkkoja mutta ne osoittavat käyttöiän suuruusluokan ja niitä voidaan käyttää eri vaihtoehtojen vertailussa.

### 3.12.2 Veden laadun vaikutus

Veden laadulla ja jatkuvalla virtausnopeudella on ratkaiseva merkitys putkityypin ja lisäsuojauksen valinnassa. Ilman lisäsuojauksta teräspankkin korroosio voi tietyissä olosuhteissa olla nopeaa.

Korroosio vedessä riippuu useista eri tekijöistä. Vesi voi sisältää syövyttäviä aineita joko liuenneena tai hiukkasina. Virtaava vesi ja siinä olevat maa-ainekset aiheuttavat putken suojauskerrosten kulumista.

Suunnittelun lähtötiedoiksi ja olosuhdeluokan määrittämiseksi tarvitaan veden pH-arvo ja virtausnopeus. Veden pH-arvo on mitattava siltapaikkatutkimuksissa. Vanhaa putkisiltaa uusittaessa voidaan käyttää Siltarekisterin tarkastustiedoissa olevaa pH-arvoa, jos sen päivitys on enintään 5 vuotta vanha. Mitoitusvirtausnopeus lasketaan uoman keskiylivirtaamasta, jonka arvo saadaan Ympäristökeskuksen aukkolausunossa mainitusta ylivirtaamasta (HQ20) ja vastaavasta uoman poikkipinta-alasta vedenkorkeudella HW20 kertomalla näin saatu virtausnopeus luvulla 0,65.

### 3.12.3 Olosuhdeluokat

Putken eri osat luokitellaan käyttöolosuhteiden perusteella olosuhdeluokkiin 1–4. Olosuhdeluokat on aina ilmoitettava suunnitelmassa.



Olosuhdekerroin  $k_i$  ( $i = 1-4$ ) liittyy olosuhdeluokkaan ja ilmoittaa putken ja sen suoja-kerrosten kulumisnopeuden olosuhdeluokkaan 1 verrattuna.

Mitoitusvirtausnopeutena olosuhdeluokissa käytetään keskimäärin kahden vuoden aikana uomassa esiintyvää keskimääräistä virtausnopeutta  $v_{HW}$  [m/s] yliveden HW tai ylivirtaaman HQ aikana.

Putken eri osat kuuluvat olosuhdeluokkiin 1–4 seuraavasti:

Olosuhdeluokka 1, olosuhdekerroin  $k_1 = 1$

Alikulkukäytävä tai alikäytävä, kun yli- ja alikulkevaa tietä kumpaakaan ei suolata:

- Koko putki lukuun ottamatta putken sisäpuolen reunaosia 0,5 metrin korkeudelta maanpinnan ylä- ja alapuolella

Vesistösilta:

- putken sisäpuolen yläosa 0,5 m keskivedenpinnan (MW) yläpuolelta
- putken ulkopuoli, kun ylikulkevaa tietä ei suolata

Olosuhdeluokka 2, olosuhdekerroin  $k_2 = 1,5$

Alikulkukäytävä:

- putken sisäpuolen reunaosat 0,5 metrin korkeudelta maanpinnan ylä- ja alapuolella

Alikulkukäytävä tai alikäytävä, kun alikulkevaa tietä suolataan tai putki toimii karjatunnelina:

- putken sisäpuolen alaosa, ulottuen 0,5 m maanpinnan yläpuolelle.

Alikulkukäytävä ja vesistösilta, kun ylikulkevaa tietä suolataan eikä ympäristäytöön putken päälle ole rakennettu vedenpitävää suojausta:

- putken ulkopuoli kokonaan

Olosuhdeluokka 3, olosuhdekerroin  $k_3 = 2,5$

Vesistösilta:

- putken sisäpuolen alaosa ulottuen 0,5 m keskivedenpinnan (MW) yläpuolelle, kun
  - veden pH on  $> 4$  tai
  - lievästi hiova virtaus, hiekkapohja
  - mitoitusvirtausnopeus  $< 1,5$  m/s ja  $< 1,2 + \ln(h_{HW})/4$  [m/s], jossa  $h_{HW}$  on vastaava vedensyvyys [m]

Olosuhdeluokka 4, olosuhdekerroin  $k_4 = 4$

Vesistösilta:

- putken sisäpuolen alaosa ulottuen 0,5 m keskivedenpinnan (MW) yläpuolelle, kun
  - veden pH on 3–4 tai
  - kohtuullisen hiova virtaus, hiekka- tai sorapohja
  - mitoitusvirtausnopeus  $< 4,5$  m/s ja  $< 3,1 + \ln(h_{HW})$  [m/s], jossa  $h_{HW}$  on vastaava vedensyvyys [m].

Olosuhdeluokitusta ei käytetä, vaan kohde suunnitellaan erikoistapauksena, kun

- veden pH on  $< 3$  tai
- virtausnopeus  $> 4,5$  m/s.

#### 3.12.4 Teräsputken käyttöikään vaikuttavat tekijät

Teräsputken kestävyyyteen korroosiota vastaan vaikuttavat levypaksuus, sinkitys ja lisäsuojaus.

##### Levypaksuus

Rakenteen säilyvyyteen ja muodonmuutosten välttämiseen perustuvat teräslevyn minimiainepaksuudet on esitetty kohdassa 3.1.

Käyttöikälaskelmissa voidaan elinkaaren lopussa sallia teräsprofiilin paksuuteen 20 % ruostumisesta johtuva syöpymisvara. Elinkaaren loppuvaiheessa ympäristäytöt ovat tiivistyneet teräsputkisillan käyttöönnoton aikaisista arvoista, joten ohuempikin ainevahvuus riittää putkessa. Levypaksuuden syöpymisvara voi olla erilainen putken sisä- ja ulkopuolella, kunhan yhteenlaskettu syöpymisvara ei ylitä 20 %. Esimerkiksi, jos käytetään putken sisäpuolella 15 % ja ulkopuolella 5 % syöpymisvarasta, levypaksuuden osuus T1 putken sisäpuolen käyttöiässä on 0,15-levypaksuus jaettuna syöpymisnopeudella ja sisäpuolen käyttöiässä 0,05-levypaksuus jaettuna syöpymisnopeudella. Suurentamalla staattisella mitoituksella saatua levypaksuutta voidaan putken mitoitusikäiä lisätä, joskin keino on kallis ja tehoton.

Käyttöikämitoituksessa käytettävät teräsputken levypaksuuden syöpymisnopeudet eri olosuhdeluokissa on esitetty taulukossa 3.5.

##### Sinkitys

Sinkkikerroksen paksuutena käyttöikälaskelmissa käytetään taulukoiden 2.1 ja 2.2 keskimääräisen kerrospaksuuden arvoja. Sinkkikerroksen kestoian osuus T2 putken käyttöiässä on sinkkikerroksen paksuus jaettuna syöpymisnopeudella.

Käyttöikämitoituksessa käytettävät sinkkikerroksen syöpymisnopeudet eri olosuhdeluokissa on esitetty taulukossa 3.5. Alumiinisinkkikerros syöpyy vain 30 % sinkkikerroksen arvoista.

##### Lisäsuojaus maalaamalla tai pinnoittamalla

Sinkityksen ja epoksimaalauksen muodostama yhdistelmäpinnoitus on kestoältään 1,5-kertainen verrattuna osakerrosten yhteenlaskettuun kestoikään erillisinä kerroksina. Lisäsuojauksen kestoian osuus T3 putken käyttöiässä on suojauksen kerrospaksuus jaettuna kulumisnopeudella.

Käyttöikämitoituksessa käytettävät maalausjärjestelmillä sekä muulla polymeeripinnoitteella tehtyjen lisäsuojauksen kulumisnopeudet eri olosuhdeluokissa on esitetty taulukossa 3.5.

*Taulukko 3.5 Käyttöikämitoituksessa käytettävät syöpymis- ja kulumisnopeudet eriolo-  
suhdeluokissa,  $\mu\text{m}/\text{v}$ .*

	Olosuhdeluokka			
Materiaali	1	2	3	4
Levyypaksuus	30	45	75	120
Sinkitys	2	3	5	8
Epoksipiki- tai epoksitervamaali	4	6	10	15
Hartsimodifioitu epoksimaali	3	5	8	12
Muu polymeeri-pinnoite	2,5	3,5	6	9,5

### 3.12.5 Lisäsuojaus

Teräsputken lisäsuojaukseen tarvitaan sinkkipinnoitteen lisäksi vaativissa olosuhteissa ja erityisesti vesistöputken ala-osaan, jossa vedenkorkeuden vaihtelualue on vaurioitumisherkkin. Lisäsuojaukseen tarvitaan yleensä, kun

- veden virtaus on voimakasta
- veden pH on alhainen
- putki asennetaan veteen ja täyttömateriaali on murskattua kiviainesta
- veneily tai muu liikenne saattaa aiheuttaa sinkitykseen vaurioita
- putken pääasiallinen käyttötarkoitus on karjatunneli
- ulkonäköseikoille asetetaan erityisiä vaatimuksia.

Lisäsuojausmenetelmänä tulevat kyseeseen

- maalaus
- muu polymeeripinnoitus
- suodatinkangas
- ruiskubetonointi
- katodinen suojaus.

Sinkin ja maalauksen muodostaman yhdistelmäpinnoitteen kestoikä on pitempi kuin sinkki- ja maalikerrosten yhteenlasketut kestoiät. Lisäsuojauksen käyttöikää lisäävä vaikutus lasketaan käyttöikämitoituksessa (kohta 3.12.6).

Maalaus- pinnoitustyössä sekä pintakäsittelysuunnitelman laatimisessa noudatetaan soveltuvien osien InfraRYL:n /13/ luvun 42050 ja SILKO-ohjeen 2.354 /28/ laatuvaatimuksia ja ohjeita.

Maalausjärjestelmät ja pinnoitus

Olosuhdeluokassa 1 lisäsuojaukseen ei yleensä tarvita vaan sinkitys on riittävä korroosiosuoja. Jos alikulkukäytävän näkyvään sisäpintaan halutaan tehdä lisäsuojaus ulkonäkösyistä, voidaan käyttää modifioitu-epoksi (R) EP tai epoksi-polyuretaani EPPUR maalausjärjestelmää, jolloin värisävyjä on valittavissa runsaasti.

Olosuhdeluokissa 1–3 käytettäviä lisäsuojausmenetelmiä ovat

- hartsimodifioitu epoksimaali (R)EP 100/2-400/4 FeZnSaS ( $\approx$  TIEL 4.4)
- epoksi-polyuretaanimaali EPPUR 100/2-400/4 FeZnSaS ( $\approx$  TIEL 4.20)
- muu polymeeripinnoitus  $\geq 250 \mu\text{m}$ .

Olosuhdeluokassa 4 käytettäviä lisäsuojausmenetelmiä ovat

- hartsimodifioitu epoksimaali (R)EP 300/3-400/4 FeZnSaS ( $\approx$  TIEL 4.4)
- epoksinpinoitus EP 400/1-FeZnSaS.
- muu polymeeripinnoitus  $\geq 250 \mu\text{m}$  (ks. kohta 2.8.4).

Pinnoitepaksuudet valitaan maalinalmistajien tuote- ja käyttöselosteitten mukaan. Esimerkkejä maalivalmistajien tällä hetkellä voimassa olevista maaliyhdistelmistä ovat:

Tikkurila	Kuivakalvo
TEMACOAT RM40	80-125 $\mu\text{m}$

Teknos	
TEKNOPLAST HS 150	80-150 $\mu\text{m}$

Nor-maali	
EPOTEX HB	80-200 $\mu\text{m}$

Suodatinkangasta käytetään putken ulkopuolen sinkityksen ja lisäsuojauksen suojaamiseen rakentamisen aikana syntyviltä vaurioilta sekä tie- että rautatiesilloilla. Suodatinkankaan käyttöluokan tulee olla N3.

Ruiskubetonointia voidaan käyttää vesistöputkien pohjalevyjen suojaamiseen voimakkaan virtauksen aiheuttamaa kulumista vastaan. Yleensä ruiskubetonointia käytetään vain käyttöiän jatkamiseksi tarkoitettuna korjausmenetelmänä /27/.

Katodinen suojaus on mahdollinen vaihtoehto lisäsuojaukseksi olosuhdeluokissa 3 ja 4. Suojausta varten tarvitaan erikoisasiantuntijan tekemä siltakohtainen suunnitelma ja jatkuva huoltosopimus. Yleensä katodinen suojaus tulee harkittavaksi vain käyttöiän jatkamiseksi tarkoitettuna korjausmenetelmänä.

### 3.12.6 Yksinkertaistettu käyttöikämitoitus

Käyttöikämitoitus tehdään erikseen kuhunkin olosuhdeluokkaan kuuluville putken osille.

1. Määritetään putken eri rasitusolosuhteissa olevien osien olosuhdeluokat (1, 2, 3 tai 4).
2. Lasketaan putken mitoitusikä KI seuraavista kaavoista:

a) sinkitty putki ilman lisäsuojausta  
 $KI = T_1 + T_2$

b) sinkitty putki lisäsuojattuna  
 $KI = T_1 + 1,5 \cdot (T_2 + T_3)$

joissa T1 = levypaksuuden osuus mitoituskäyttöiässä  
T2 = sinkityskerroksen kestoikä  
T3 = lisäsuojauksen kestoikä

Kestoikien T1, T2 ja T3 laskennassa tarvittavat tiedot ovat kohdassa 3.12.4.

3. Verrataan mitoituskäyttöikää suunnittelukäyttöikään tai asetettuun tavoitekäyttöikään ja sovitetaan osatekijät sellaisiksi, että mitoituskäyttöikä ylittää sen.

Tällä menettelyllä laskettu käyttöikä ei ole tarkka, joten verrattaessa laskettua mitoituskäyttöikää tavoitekäyttöikään sallitaan toleranssi -2 vuotta.

Esimerkki 1: Alikulkukäytävä, yli- ja alikulkevaa tietä kumpaakaan ei suolata. Levypaksuus 3,50 mm, sinkityksen paksuus 70 µm. Suunnittelukäyttöikä on 50 vuotta.

Ulkopuoli ja sisäpuolen ylä- ja alaosa, olosuhdeluokka 1:

- $KI = T1 + T2 = 0,13 \cdot 3500 \mu\text{m} / 30 \mu\text{m} + 70 \mu\text{m} / 2 \mu\text{m} = 15,2 + 35,0 = 50,2 \text{ v}$ , joka täyttää vaatimuksen 50 v.

Sisäpuolen reunaosat, olosuhdeluokka 2:

- $KI = T1 + T2 = 0,07 \cdot 3500 \mu\text{m} / 45 \mu\text{m} + 70 \mu\text{m} / 3 \mu\text{m} = 5,4 + 23,3 = 28,7 \text{ v}$ , joka on < 50 v.

→ Lisäsuojaus, epoksipikimaali 120 µm, jolloin:

- $KI = T1 + 1,5 \cdot (T2 + T3) = 0,07 \cdot 3500 \mu\text{m} / 45 \mu\text{m} + 1,5 \cdot (70 \mu\text{m} / 3 \mu\text{m} + 120 \mu\text{m} / 6 \mu\text{m}) = 5,4 + 1,5 \cdot (23,3 + 20,0) = 70,4 \text{ v}$ , joka on > 50 v.

Esimerkki 2: Vesistöputki, ylikulkevaa tietä suolataan, veden pH 3,5, virtausnopeus 2,5 m/s. Levypaksuus 3,50 mm, sinkityksen paksuus 70 µm. Suunnittelukäyttöikä on 50 vuotta.

Sisäpuolen alaosa, olosuhdeluokka 4:

- $KI = T1 + T2 = 0,20 \cdot 3500 \mu\text{m} / 120 \mu\text{m} + 70 \mu\text{m} / 8 \mu\text{m} = 5,8 + 8,8 = 14,6 \text{ v}$ , joka on < 50 v.

→ Lisäsuojaus, hartsimodifioitu epoksimaali 240 µm, jolloin:

- $KI = T1 + 1,5 \cdot (T2 + T3) = 0,20 \cdot 3500 \mu\text{m} / 120 \mu\text{m} + 1,5 \cdot (70 \mu\text{m} / 8 \mu\text{m} + 240 \mu\text{m} / 12 \mu\text{m}) = 5,8 + 1,5 \cdot (8,8 + 20,0) = 49,0 \text{ v}$ , joka on sallitun toleranssin perusteella hyväksyttävä (50-2 v).

Sisäpuolen yläosa, olosuhdeluokka 1:

- $KI = T1 + T2 = 0,20 \cdot 3500 \mu\text{m} / 30 \mu\text{m} + 70 \mu\text{m} / 2 \mu\text{m} = 23,3 + 35,0 = 58,3 \text{ v}$ , joka on > 50 v.

Ulkopuoli, olosuhdeluokka 2:

- $KI = T1 + T2 = 0,0 \cdot 3500 \mu\text{m} / 45 \mu\text{m} + 70 \mu\text{m} / 3 \mu\text{m} = 0,0 + 23,3 = 23,3 \text{ v}$ , joka on < 50 v.

→ Lisäsuojaus, epoksipikimaali 120 µm, jolloin:

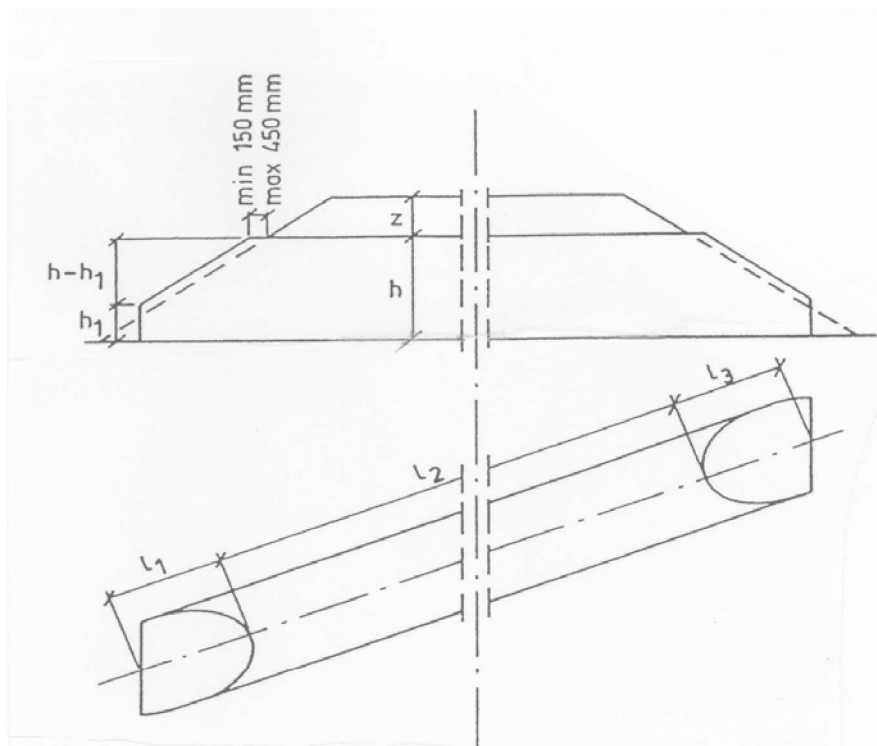
$KI = T1 + 1,5 \cdot (T2 + T3) = 0,0 \cdot 3500 \mu\text{m} / 45 \mu\text{m} + 1,5 \cdot (70 \mu\text{m} / 3 \mu\text{m} + 120 \mu\text{m} / 6 \mu\text{m}) = 0,0 + 1,5 \cdot (23,3 + 20,0) = 65,0 \text{ v}$ , joka on > 50 v.

## 4 Muu suunnittelu

### 4.1 Putken viiste ja suuntakulma

Putken päät viistetään yleensä luiskan kaltevuuteen. Viiste aloitetaan määräkorkeudesta, joka on kolmasosa putken korkeudesta. Tämä vastaa matalarakenteisilla putkilla alanurkkalevyn yläreunan korkeutta. Viistesuhde määritetään kuvassa 4.1 esitetyllä tavalla. Putken päiden viistämisessä on otettava huomioon myös putken suuntakulma.

Putken viisteosan taipuma sisäänpäin ei saa aiheuttaa sillan vapaan aukon alituksia eikä poikkileikkauksen kaventumista enempää kuin  $D/150$ . Loivissa luiskissa putken viistettyä osaa joudutaan vahvistamaan lisäjäykisteellä. Myös raudoitettun maan käyttö viisteeseen tulevien maanpaineiden pienentämiseksi voi tulla kysymykseen käyttöikämitoitus huomioon ottaen.



Kuva 4.1 Putken pituuden ja viistesuhteen määrittäminen

Kuvan 4.1 mukaisen putken pituudet ja viisteet lasketaan seuraavasti:

**Pituus:**

- alapituus =  $l_1 + l_2 + l_3$
- lakipituus =  $l_2$

Huom. Tarkastettava, että  $l_2 \geq l_1 + l_3$

**Viiste:**

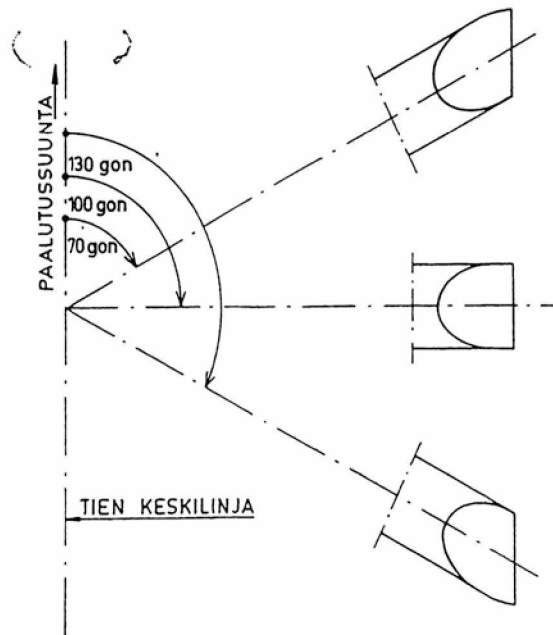
- viisteen alkamiskorkeus  $h_1 = h/3$
- viistesuhde  $= (h - h_1) / l_1$
- $z$  = peitesyvyys

Putki pyritään ensisijaisesti sijoittamaan kohtisuoraan tien alitse. Putki voidaan sijoittaa tien keskilinjaan nähden vinoon, jos

- putki asennetaan uomaan, jota ei ole tarkoituksenmukaista siirtää
- alittavan tien linjaus edellyttää vinoa risteämistä
- putki saadaan näin kokonaisuudessaan kantavan pohjamaan varaan.

Vinoon sijoitetun putken pää voi olla tien suuntainen (kuva 4.2) tai siitä poikkeava, myös kohtisuora.

Tiesilloissa suuntakulman suositusarvot ovat välillä 70 - 130 gon (kuva 4.2). Rautatie-silta tulee sijoittaa kohtisuoraan radan alitse.



Kuva 4.2 Suuntakulma

## 4.2 Putken pituus

Putken pituudella voidaan tarkoittaa sekä putken laen keskilinjaan pituutta (lakipituus) että putken pohjan keskilinjaan pituutta (alapituus) (kuva 4.3). Siltarekisteriin kirjataan vain lakipituus.

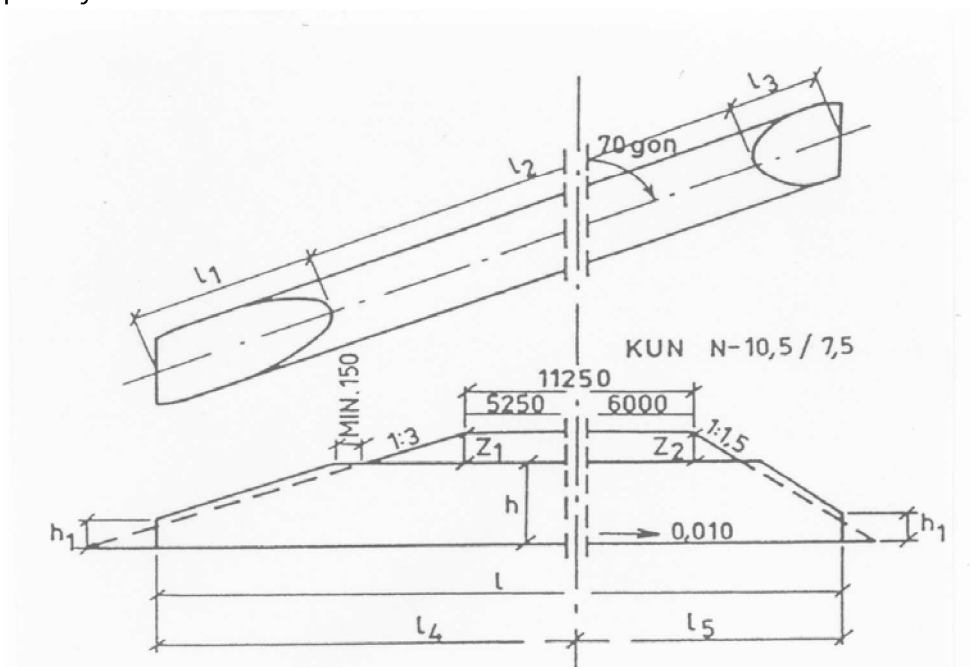
Putken lakipituus määräytyy tien poikkileikkauksen ja peitesyvyyden perusteella. Jos putken pää on viistetty, putken yläpinnan on ulotuttava vähintään 150 mm ja enintään

450 mm tieluiskan ulkopuolelle. Rataluiskien leveydessä huomioidaan raiteen nosto (200 mm).

Putken alapituus määritetään viistetyissä putkissa lakipituuden, luiskan kaltevuuden, viisteen alkamiskorkeuden ja suuntakulman perusteella (kuva 4.2). Alapituutta voidaan kasvattaa lasketusta pituudesta siten, että putken suuntainen levyjako menee tasan, kuitenkin enintään 600 mm / pääty.

Jos putken pää on suora, putken pituus määritetään yleensä siten, että noin kolmasosa putken korkeudesta jää tieluiskan sisään. Jos putki on tätä lyhyempi, putken pääte on tuettava kovalla verhouksella tai tukimuurilla.

Putken pituutta määritettäessä myös ulkonäköseikat on otettava huomioon. Suora pää ei yleensä ole esteettinen.



Kuva 4.3 Putken pituuden määrittäminen, esimerkki

Kuvan 4.3 lähtötiedoilla voidaan määrittää putken mitat.

Putki: pituuskaltevuus 1 %, peitesyvyyydet:  $z_1 = 600$ ,  $z_2 = 720$ , korkeus  $h = 1800$ , viisteen alkamiskorkeus  $h_1 = 600$ .

Lakipituus: Määritetään tien poikkileikkauksen, suuntakulman ja peitesyvyyden perusteella, lisättynä minimiylityksellä 2·150 mm. Kun suuntakulma on 70 gon, vinoudesta aiheutuva pidentymäkerroin on  $1/\sin(70\text{ gon}) = 1,12$ .

$$l_2 = (11250 + 3 \cdot 600 + 1,5 \cdot 720 + 2 \cdot 150) \cdot 1,12 = 16160.$$

Alapituus: Määritetään lakipituuden ja viisteiden perusteella.

$$l = l_2 + l_1 + l_3 = 16160 + (3 \cdot 1200 + 1,5 \cdot 1200) \cdot 1,12 = 22210.$$

Lisäksi määritetään pituudet  $l_4$  ja  $l_5$ :  $l_4 = 12095$ ,  $l_5 = 10115$ .



## 4.3 Vierekkäiset putket

Jos rajoitetun pengerkorkeuden tai muiden syiden takia käytetään vierekkäisiä putkia, putkien välisen etäisyyden on oltava vähintään taulukon 4.1 mukainen riittävän maan sivupaineen kehittymiseksi putkien välissä.

Taulukko 4.1 Vierekkäisten putkien vähimmäisetäisyys

Putken leveys	Vähimmäisetäisyys
$D \leq 3 \text{ m}$	1,0 m
$3 < D \leq 9 \text{ m}$	$D / 3$
$D > 9 \text{ m}$	3,0 m

## 4.4 Perustaminen

### 4.4.1 Yleistä

Teräspankkuisillan perustaminen suunnitellaan ohjeen Sillan geotekninen suunnittelu /35/ mukaan, niin että ne täyttävät standardin SFS-EN 1997-1 /8/, kansallisessa liitteessä sekä soveltamisohjeessa *Geotekninen suunnittelu - NCCI 7 /10/* esitetyt vaatimukset. Roudan vaikutus otetaan huomioon saman suunnitteluohjeen mukaisesti. Suunnittelu on tehtävä siten, että

- maapohjan ja rakenteen varmuudet murtumista vastaan ovat riittävän suuret sekä rakennusaikana että rakenteen käyttöaikana
- rakenteen painumat, siirtymät, kiertymät ja muodonmuutokset pysyvät niin pieninä, etteivät ne haittaa rakenteen käyttöä eivätkä niiden aiheuttamat rasitukset kasva liian suuriksi
- rakentamisen vaikutus pohjaveteen ja rakentamisen vaatimien täyttöjen vaikutus otetaan huomioon.

Teräspankkuisilta perustetaan aina kaivannon pohjalle tai yhtenäisen paalulaatan päälle sorasta tai murskeesta rakennettavan tiivistetyn alustäytön varaan. Jos teräspankkuisilta perustetaan vanhan peruslaatan tai kovan arinan päälle, on putkisillan alustäyttö suunniteltava ja rakennettava niin, että sen jäykkyys on koko putken alueella likimain samanlainen. Teräsholvisillan teräsbetonianturat voidaan perustaa ympärystäytön toiminta huomioon ottaen myös suoraan paalujen varaan.

Alustäyttö on ulotettava putken pituussuunnassa vähintään paksuutensa verran putken päiden ulkopuolelle. Alustäytön paksuus suunnitellaan tapauskohtaisesti ottaen huomioon pohjamaan kantavuus ja routasuojaustarve ohjeen *Sillan geotekninen suunnittelu /35/* mukaisesti. Vähimmäispaksuus on 300 mm. Alustäytön alaosaan tehdään tarvittaessa 100 - 200 mm paksuinen suodatinkerros tai käytetään suodatin-kangasta. Alustäyttöä ei kuivateta alikulkukäytävää rakennettaessa.

Teräsputkisiltojen suunnittelussa on lisäksi otettava erityisesti huomioon

- tulopenkereiden liittyminen viereisiin tie- ja pohjarakenteisiin
- kuivatuksen kokonaisjärjestelyt
- veden luonnollinen virtaus vesistöissä
- alikulkevan tien tarkoituksenmukainen sijainti liikenteen kannalta.

Sillan tulopenkereet suunnitellaan ohjeen Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet /23/ mukaan. Ohjeessa on esitetty vaatimukset muun muassa vakavuudelle ja sallitulle painumalle.

#### 4.4.2 Sillan painuma

Teräsputkisillan ja teräsholvisillan alusrakenteiden sallitun painuman, kiertymän tai painumaeron määrittää aina suunnittelija. Sillan painuman arvioinnissa huomioidaan mm.

- tiepenkereestä ja muista maarakenteista muodostuva pohjamaan lisäkuormitus
- sillan ympäristäytöstä muodostuva pohjamaan lisäkuormitus
- pohjaveden pinnan aleneminen.

Putkisillat suunnitellaan siten, että painumisesta ei ole haittaa liikenteelle. Tien pinnan painuman raja-arvot on esitytetty ohjeessa Teiden pohjarakenteiden suunnittelu-perusteet TIEH 2100002-01,. Rautateitä koskevat vaatimukset on esitetty ohjeessa RATO 3 Radan rakenne.

Teräsputkisillan keskikohta painuu homogeenisissa pohjaolosuhteissa pengerkuorman vaikutuksesta enemmän kuin putken päät. Tasaisessa koko putken pituudella tapahtuvassa putken taipumassa taipuneen putken taivutussäteen pitää olla  $\geq 200 \cdot H_k$  ( $H_k$  on putken kokonaiskorkeus). Eri putkipituuksille laskettuja sallittuja taipuma-arvoja on taulukossa 4.2.

Taulukko 4.2 Teräsputken sallitut taipumat

Putken alapinnan pituus (m)	Sallittu taipuma (mm)
10	$60 / H_k$
15	$140 / H_k$
20	$250 / H_k$
30	$560 / H_k$
60	$1250 / H_k$
$H_k$ = putken kokonaiskorkeus (m).	
Väliarvot interpoloidaan suoraviivaisesti.	

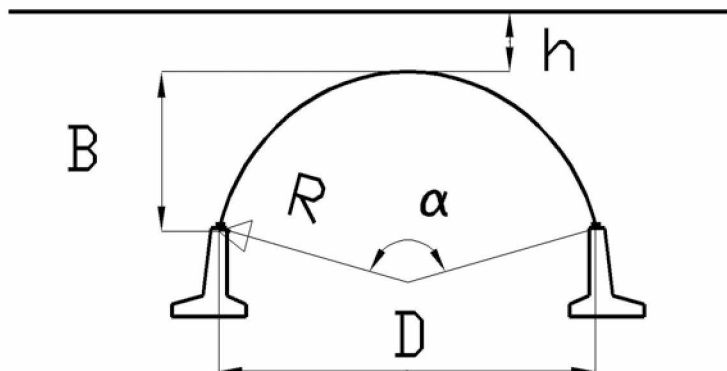
Putken tasaista painumaa voidaan kompensoida esikorotuksella, joka saa olla enintään 50 % lasketusta taipumasta. Korotuksen suuruus ei saa ylittää putken valmistajan sallimaa enimmäiskorotusta.

Putken pituussuuntainen paikallinen painumaero saa olla enintään  $H_k / 250$ . Painumaeroa tarkastettaessa mittausvälin tulee olla  $\leq 2 \cdot H_k$ .

Putken pituusakseliin nähden poikittainen painumaero saa aiheuttaa enintään 1 ‰:n kallistuman.

#### 4.4.3 Teräsholvisillan perustukset

Teräsholvisilta tuetaan perustuksiin kiinnitettyihin U-muotoisiin teräsprofiileihin siten, että tuentaan ei tule taivutusta. Tukipisteeseen tuleva normaalivoima voidaan laskea ruotsalaisen mitoitusohjeen mukaan /2/.

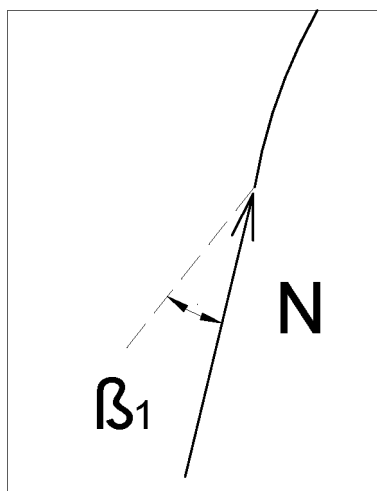


Kuva 4.4 Teräsholvisillan olennaiset mitat

Ellei muita hyväksyttäviä laskelmia tehdä, sillan perustukset tulee mitoittaa laskelmista saatavalle normaalivoimalle ottaen huomioon kussakin kuormitustapauksessa normaalivoiman suunta-poikkeama  $\beta_1$  tangentin suunnasta (taulukko 4.3).

Taulukon 4.3 arvoja voidaan soveltaa vain teräsholvisilloille, joiden poikkileikkaus on ympyränmuotoinen, kaaren kulma välillä  $\alpha = 150^\circ\text{--}180^\circ$ , kaaren säde välillä  $R = 2\text{--}3\text{ m}$  ja aallon korkeus 50–160 mm.

Taulukossa 4.3 annettujen arvojen  $h$  ja  $R$  väliin sattuvat  $\beta_1$  arvot voidaan interpoloida lineaarisesti.



Kuva 4.5 Teräsholvisillan tukireaktiot.

Taulukko 4.3 Normaalivoiman suuntapoikkeamat

		R = 2 m	R = 3 m
Kuormitustapaus	h	$\beta_1$	$\beta_1$
Maanpaino	0,5	0,5	0,3
Pelkkä liikenne		7,5	4,0
Liikenne + maanpaino		4,5	3,5
Liikenne + maanp. + jarru		8,5	5,0
Maanpaino	1,0	3,0	2,0
Pelkkä liikenne		6,0	5,0
Liikenne + maanpaino		4,0	3,5
Liikenne + maanp. + jarru		6,0	5,2
Maanpaino	2,0	3,0	2,5
Pelkkä liikenne		5,5	6,0
Liikenne + maanpaino		4,0	3,0
Liikenne + maanp. + jarru		6,0	3,5
Maanpaino	5,0	3,5	3,0
Pelkkä liikenne		4,5	3,5
Liikenne + maanpaino		4,0	3,0
Liikenne + maanp. + jarru		4,0	3,0

Taulukko 4.3 on laskettu kuormalle LM1. Mikäli kuorma LM2 on määräävä, kuormitustapauksista  $N_{\max}$  vastaavaa  $\beta_1$ :n arvoa on korotettava 30 %. Putkisillan perustuksia ei tarvitse tarkastaa LM3 kuormalle. Rautatiesiltojen suunnitteluun taulukkoa 4.3 ei pidä soveltaa.

Perustusta mitoitettaessa otetaan huomioon ennakoidut painumat perustuksen pituussuunnassa. Perustuksen vakavuus on suunniteltava siten, ettei sen yläreuna holvin tuentapisteen kohdalla siirry liikkuvasta kuormasta vaakasuunnassa enempää kuin  $0,003 \cdot (H_k + h)$  tai enintään 20 mm. Siirtymiä laskettaessa holvin vaakavoimia es-tävää vaikutusta ei oteta huomioon.

#### 4.4.4 Perustamistavat

Teräsputkien eri olosuhteissa tyypillisten perustamistapojen ohjeelliset mallikuvat on esitetty liitteessä 2.

Siltapaikan sijaitessa kantavalla maaperällä putki perustetaan kaivannon pohjalle rakennettavan tiivistetyn alustäytön varaan (perustamistavat A ja B).

Routivalle pohjamaalle rakennettava putki perustetaan tiivistetylle alustäytölle routimattomaan perustamissyvyyteen ulottuvan routimattoman massanvaihdon varaan tai putki on routasuojattava (perustamistapa C). Routasuojauksen on täytettävä ohjeessa *Sillan geotekninen suunnittelu* /35/ esitetyt vaatimukset.

Mikäli maaperä on huonosti kantavaa, mutta edellytykset putkisillan rakentamiseksi maanvaraisena täyttyvät, voidaan alustäytön alla käyttää lavarakennetta, jotta täyttö voidaan tiivistää pehmeällä ja häiriintymisherkällä pohjamaalla. Lavan rakenteesta tehdään yksityiskohtaiset geotekniset ja rakennepiirustukset. Lava voidaan tehdä myös teräksisenä poimulevyrakenteena tai lujiterakenteena, jotka on suunniteltava tapauskohtaisesti (perustamistapa D).

Jos sillan peruskaivanto tehdään tuetussa kaivannossa, tehdään kaivanto-suunnitelma joko osana rakennussuunnitelmaa tai rakennustyöhön liittyvänä työ-suunnitelmana. Kaivantosuunnitelmassa esitetään tuennan geotekninen ja rakenne-tekninen mitoitus ja rakenteet sekä pohjaveden hallinta yksityiskohtaisesti työvai-heittain (perustamistapa E).

## 4.5 Siirtymäkiila

Siirtymäkiila tehdään putken yhteyteen väylän alusrakenteen routivuus- ja kanta-vuuserojen tasaamiseksi sekä niistä aiheutuvien epätasaisten routimismousujen ja painumien aiheuttamien haittojen pienentämiseksi. Kevyen liikenteen väylillä siirty-mäkiilojen tarve harkitaan siltakohtaisesti. Siirtymäkiilat suunnitellaan ohjeen Tiera-kenteen suunnittelu kohdan 3.5 mukaisesti /29/.

Rautatiesillan siirtymäkiilat suunnitellaan noudattaen InfraRYL:n /12/ määräyksiä ja ohjeita.

## 4.6 Verhoukset ja eroosiosuojaus

Jos virtaavan veden, aallokon, jään tai muun kuluttavan voiman aiheuttama eroosio on voimakasta, putken päätyyn on tehtävä eroosiosuojaus ohjeen *Sillan geotekninen suunnittelu* /35/ mukaisesti.

Pengerluiskiin tehdään samanlainen verhous kuin väylän muillakin osilla, yleensä nurmi- tai turveverhous. Putken päädyt on verhottava kestävämmiin, jolloin on käytet-tävä kovia verhouksmateriaaleja. Verhouksen suunnittelussa voidaan käyttää apuna verhousten rakentamista käsitteleviä SILKO-ohjeita /21/.

## 4.7 Tukimuurit

Tukimuuria käytetään putken päädyssä silloin, kun pääty joudutaan tekemään kalte-vuudeltaan jyrkemmäksi kuin 1:1. Pienehköissä kohteissa voidaan tulla toimeen palk-kiverhouksella (kerroskivirakenne) tai lounhelaatikolla. Vaativimmissa kohteissa tuki-muuri tehdään teräsbetonista tai kivitörmästä siltakohtaisen suunnitelman mukaisesti.

## 4.8 Kuivatus

Alikulkukäytävien yhteydessä on suunniteltava pintavesien poisjohtaminen pinta-vesikouruilla tai -putkilla tai tarvittaessa kokonaisvaltaisella sadevesijärjestelmällä.

## 4.9 Valaistuslaitteet ja kiinnikkeet

Alikulkukäytäviin joudutaan usein kiinnittämään valaisimia ja kaapelikiskoja. Valaisimien tulee olla iskunkestävää tyyppiä. Valaistus toteutetaan tilaajalla hyväksytetyn valaistussuunnitelman mukaisesti.

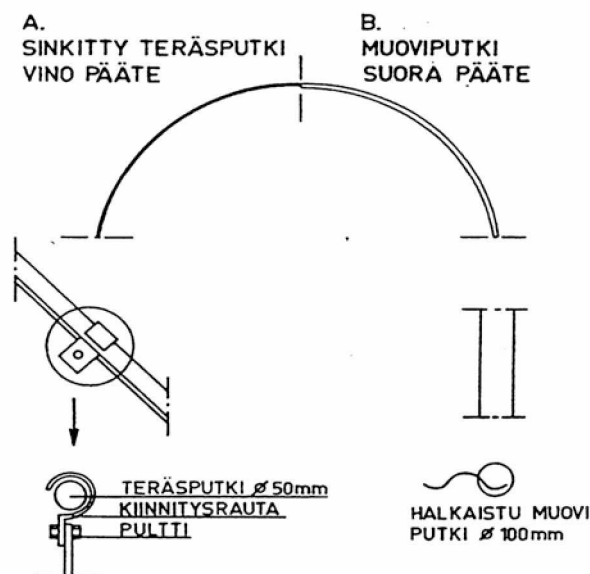
Vetotanko on suunniteltava vesistösiltoihin, joista tulee päästä läpi veneellä ja jotka ovat niin pieniä, että vene on vedettävä putken läpi. Vetotanko auttaa myös sillantarastajaa ja lisää tarkastustyön turvallisuutta. Vetotanko asennetaan putken molemmille sivuille, käyttötarkoitusta ajatellen sopivalle korkeudelle HW-pinnan yläpuolelle. Vetotanko tehdään sinkitystä vesijohtoputkesta, joka kiinnitetään putkisillan toimitajan asentamiin kiinnityspultteihin.

## 4.10 Tarkkailutapit

Teräsputkisiltaan asennetaan kolme tarkkailutappia suuntakulman oikeellisuuden mittausta ja myöhempiä muodonmittauksia varten. Tarkkailutapit ovat kuumasinkittyjä pultteja M10x20, jotka kiinnitetään putken keskilinjalle putken lakeen porattuun reikään Ø 12 mm siten, että pultin kanta on putken sisäpuolella aallon harjalla ja mutteri putken päällä aallon pohjassa. Putken pituussuunnassa tarkkailutapit sijoitetaan putken kumpaakin päätä ja lakipituuden keskikohtaa lähinnä olevan yläpuolisen aallon pohjaan.

## 4.11 Alikulkukäytävän päädyn suojaus

Alikulkukäytävän päädyn suojaus on tarpeellinen varsinkin pienissä putkissa. Suojaus voidaan tehdä esimerkiksi kuvassa 4.6 esitetyllä tavalla tai tarkoitukseen erityisesti kehitetyillä kumiprofiileilla.



Kuva 4.6 Alikulkukäytävän päädyn suojaus

## 4.12 Kaiteet

Ohjeita kaiteiden tekemisestä, laatuvaatimuksista ja pituuksista on esitetty ohjeissa *Tien poikkileikkauksen suunnittelu* /31/, *Tiekaiteiden suunnittelu* /32/, *Siltojen kaiteet* /20/, ratateknisten ohjeiden (RATO) osassa 8 /33/ sekä InfraRYL:n kohdissa 32100 ja 42451.

## 4.13 Aukko tien keski- tai välialueella

Jos putkisillassa on lyhyt aukko tien keski- tai välialueella, aukon reunat on suojattava tien pituussuuntaisilla betoni- tai teräspalkeilla. Palkkien välinen aukko saa olla enintään 0,6 m. Palkkien on kestävä lyhytaikainen onnettomuustilannetta kuvaava pystysuora pistekuorma 30 kN. Kuorman voi olettaa jakaantuvan tasan kahdelle palkille. Suistuneen auton on päästävä vapaasti liukumaan palkkien päällä.

Jalankulkijoiden putoaminen estetään tarvittaessa aukon päälle laitettavalla teräsverrolla, jonka silmän pinta-ala on enintään 100 cm<sup>2</sup>.

Edellä mainittuja aukkoja ei sallita rautatiesilloilla.

## 4.14 Maadoitus

Jos teräksinen putkisilta tehdään sähköradalle tai on oletettavissa, että rata tulevaisuudessa sähköistetään, sillan maadoituksesta on tehtävä erillinen maadoitussuunnitelma.

Ohjeita maadoitussuunnitteluun on esitetty Liikenneviraston ohjeessa Rautatiealueelle tulevien kiinteiden laitteiden ja rakenteiden maadoitussuunnittelu /34/.

## Viiteluettelo

/1/ Akselimassa tutkimus 1998-1999. Helsinki 2000. Tielaitos, tiestötiedot, Tielaitoksen selvityksiä 6/2000, 275 s. ISSN 0788-3722, ISBN 951-726-614-6, TIEL 3200598.

/2/ Design of soil steel composite bridges, Lars Pettersson, Håkan Sundqvist. KTH Arkitektur och samhällsbyggnad. ISSN 1103-4289. ISSN/KTH/BKN/R-8-SE. TRITA-BKN. Report 112, 4th Edition 2010.

/3/ Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 2: Siltojen liikennekuormat SFS-EN 1991-2. 144 s.

/4/ Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, SFS-EN 1993-1-1. 100 s.

/5/ Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus, SFS-EN 1993-1-8. 149 s.

/6/ Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-9: Väsyminen, SFS-EN 1993-1-9. 42 s.

/7/ Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 2: Terässillat, SFS-EN 1993-2 + AC. 103 s.

/8/ Eurokoodi 7. Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt, SFS-EN 1997-1. 148 s.

/9/ Eurokoodin soveltamisohje, Betonirakenteiden suunnittelu - NCCI 2, Liikenneviraston ohjeita 24/2010, ISBN 978-952-255-579-3. 110 s.

/10/ Eurokoodin soveltamisohje, Geotekninen suunnittelu - NCCI 7, 28.12.2010, Liikenneviraston ohjeita 32/2010, ISBN 978-952-255-608-0. 126 s.

/11/ Eurokoodin soveltamisohje, Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet - NCCI 1, Liikenneviraston ohjeita 23/2010, ISBN 978-952-255-578-6. 104 s.

/12/ InfraRYL 2006. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset, osa 1 Väylät ja alueet. Helsinki. Rakennustieto Oy 2006. ISBN 951-682-801-9.

/13/ InfraRYL 2006. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset, osa 3 Sillat ja rakennustekniset osat. (RT 14-10920). Helsinki. Rakennustieto Oy 2008.

/14/ InfraRYL 2009. 32100 Kaiteet, johteet ja törmäys-suojat

/15/ Jatkuvatoinimisella kuumaupotusmenetelmällä pinnoitetut ohutlevyteräkset. Tekniset toimitusehdot. SFS-EN 10346. 60 s.

/16/ Kaiteet ja suistumisonnettomuuksien ehkäisy, TIEH2100014-2

/17/ Kuumavalssatut rakenneteräkset SFS-EN 10025 luokan



/18/ Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä. SFS-EN ISO 12944-1...8

/19/ Orgaanisilla aineilla pinnoitetut (muovipinnoitetut) ohutlevyteräkset. Tekniset toimitusehdot SFS-EN 10169. 68 s.

/20/ Siltojen kaiteet. Helsinki. Tiehallinto 2006. ISBN 951-803-691-8. TIEH 2100046-06.

/21/ Siltojen korjausohjeet – SILKO. Tiehallinto. TIEH 2230096.

- SILKO 2.911 Kiviheitokeverhouksen teko
- SILKO 2.912 Kivilaattaverhouksen teko
- SILKO 2.913 Betonilaattaverhouksen teko
- SILKO 2.914 Betonikiviverhouksen teko
- SILKO 2.918 Kenttäkiviverhouksen teko
- SILKO 2.919 Kivikorirakenteiden teko

/22/ Specification for Steel Sheet, Metallic-coated, and Polymer Precoated for Corrugated Steel Pipe ASTM A742M

/23/ Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki. Tiehallinto 2001. ISBN 951-726-743-6. TIEH 2100002-01.

/24/ Teiden suunnittelu IV. Kuivatus. Helsinki. Tielaitos 1993. TIEL 2140005.

/25/ Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus. Osa 1: Vaatimukset rakenteellisten kokoonpanojen vaatimustenmukaisuuden arviointiin SFS-EN 1090-1

/26/ Teräsputkisillat. Rakentamisen laatuvaatimukset. Helsinki. Tiehallinto 2008. ISBN 978-951-803-939-9. TIEH 2200050-07.

/27/ Teräsrakenteet. Teräsputkisillan korjaaminen. Helsinki. Tiehallinto 2006. SILKO 2.341. TIEH 2230096–2.341.

/28/ Teräsrakenteet. Vanhan ja uuden sinkkipinnoitteen maalaus. Helsinki. Tiehallinto 2005. SILKO 2.354. TIEH 2230096–2.354.

/29/ Tierakenteen suunnittelu. Helsinki. Tiehallinto 2004. ISBN 951-803-402-8. TIEH 2100029-04.

/30/ Valurauta- ja teräskappaleiden kuumasinkkipinnoitteet. Spesifikaatiot ja testausmenetelmät, SFS-EN ISO 1461. 36 s.

/31/ Tien poikkileikkauksen suunnittelu, Liikenneviraston ohjeita xx/2012, ISBN xxx. xx s. [ilmestyy piakkoin...]

/32/ Tiekaiteen suunnittelu, Liikenneviraston ohjeita xx/2012, ISBN xxx. xx s. [ilmestyy piakkoin...]

/33/ Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RATO), osa 8 Sillat, Ratahallintokeskus (11.9.2002).

---

/34/ Rautatiealueelle tulevien kiinteiden laitteiden ja rakenteiden maadoitus suunnittelu, Liikenneviraston ohjeita 13/2010, ISBN 978-952-255-556-4. 68 s.

/35/ Sillan geotekninen suunnittelu, Liikenneviraston ohjeita xx/2012, ISBN xxx. xx s.  
[ilmestyy piakkoin...]

## Aallotettujen teräspanktsien perustietoja

### Rakenteiden tunnuksat ja poikkileikkaukset

Esimerkkejä halkaisijaltaan yli 2 metrin teräspanktsissa käytettävistä rakenteista kirjaintunnuksineen on esitetty taulukossa A1. Muitakin profiilirakenteita on käytettävissä.

*Taulukko 1. Tunnuksia putkirakenteille ja niiden aallotuksille.*

Rakenne	Aallotus 1)
A12 Monilevyrakenne	150 x 50 (Gävle)
A2 Monilevyrakenne	200 x 55
A3 Monilevyrakenne	380 x 140 (SuperCor)
A4 Monilevyrakenne	400 x 150 (StrenCor)
C3 Kierresaumattu rakenne	125 x 26, 260 x 20/90
C5 Kierresaumattu rakenne	210 x 50/70
1) Merkinnässä ilmoitetaan profiilin aallon pituus ja aallonkorkeus sekä aallon harjan leveys, jos profiili on tasaharjainen.	

Rakenteiden poikkileikkausarvot ja aallotuksen periaatepiirros on esitetty kohdassa A2. Uusi profiili voidaan sijoittaa luokkiin A tai C taivutusvastuksen perusteella, jolloin taulukon A3 arvoja pidetään luokan alarajana.

## Aallotettujen putkien poikkileikkausarvoja

*Taulukko 2. Profiilin poikkileikkauksen pinta-ala (teoreettinen minimiarvo)*

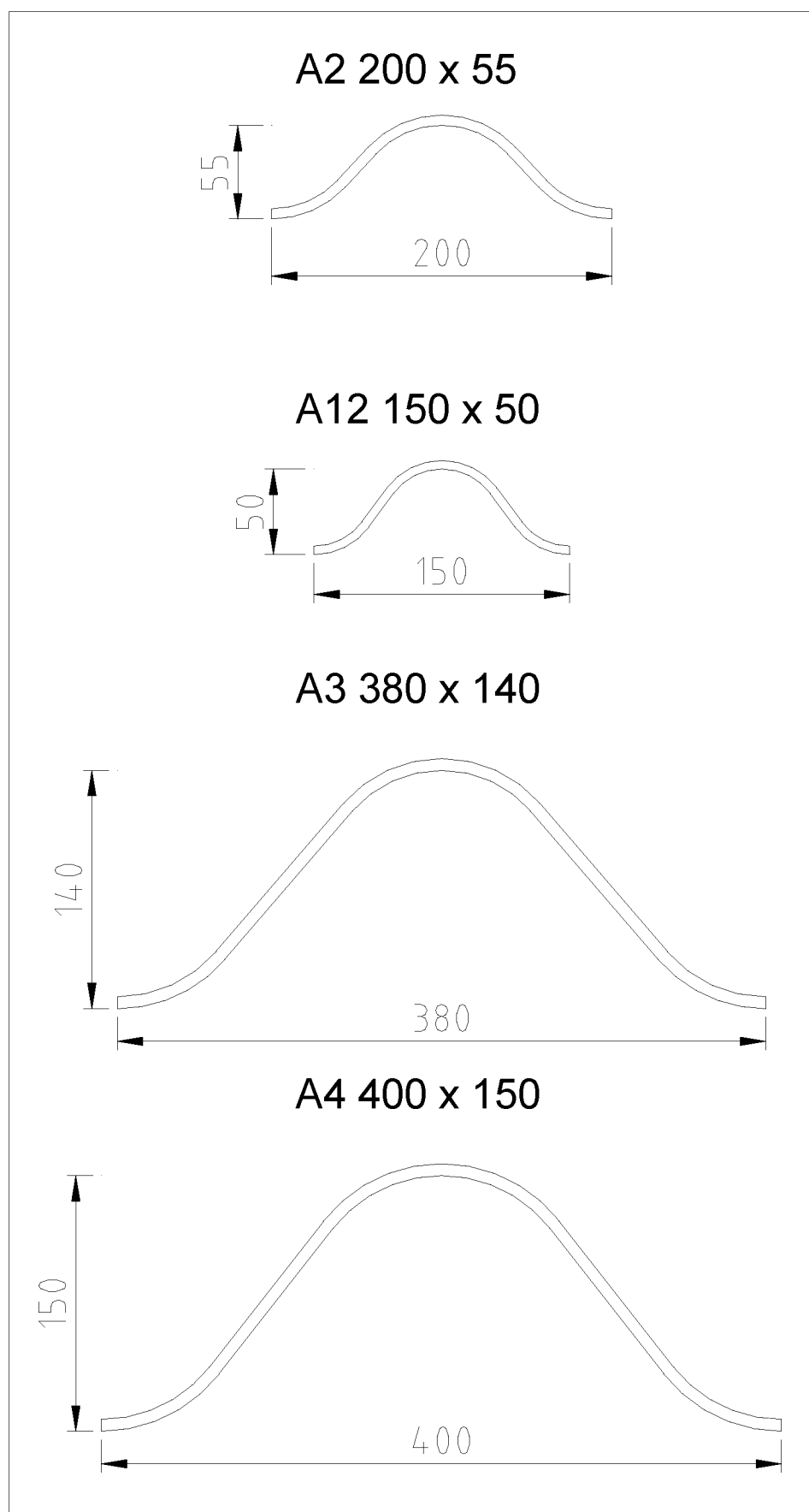
Levy- paksuus [mm]	Pinta-ala [cm <sup>2</sup> /m]					
	Rakenne					
	A12	A2	A3	A4	C3	C5
2,5	31,5	29,6	32,3		27,7	37,2
3,0	37,7	35,5	38,8	39,1	33,2	44,6
3,5	44,0	41,4	45,3	46,3	38,8	52,0
4,0	50,4	47,3	51,7	53,5	44,3	59,4
4,5	56,7	53,3	58,2	60,8		
5,0	63,0	59,2	64,7	68,1		
5,5	69,4	65,1	71,2	75,4		
6,0	75,7	71,1	77,7	82,6		
6,5	82,1	77,0	84,2	89,4		
7,0	88,5	82,9	90,7	96,1		

Väliarvot interpoloidaan lineaarisesti.

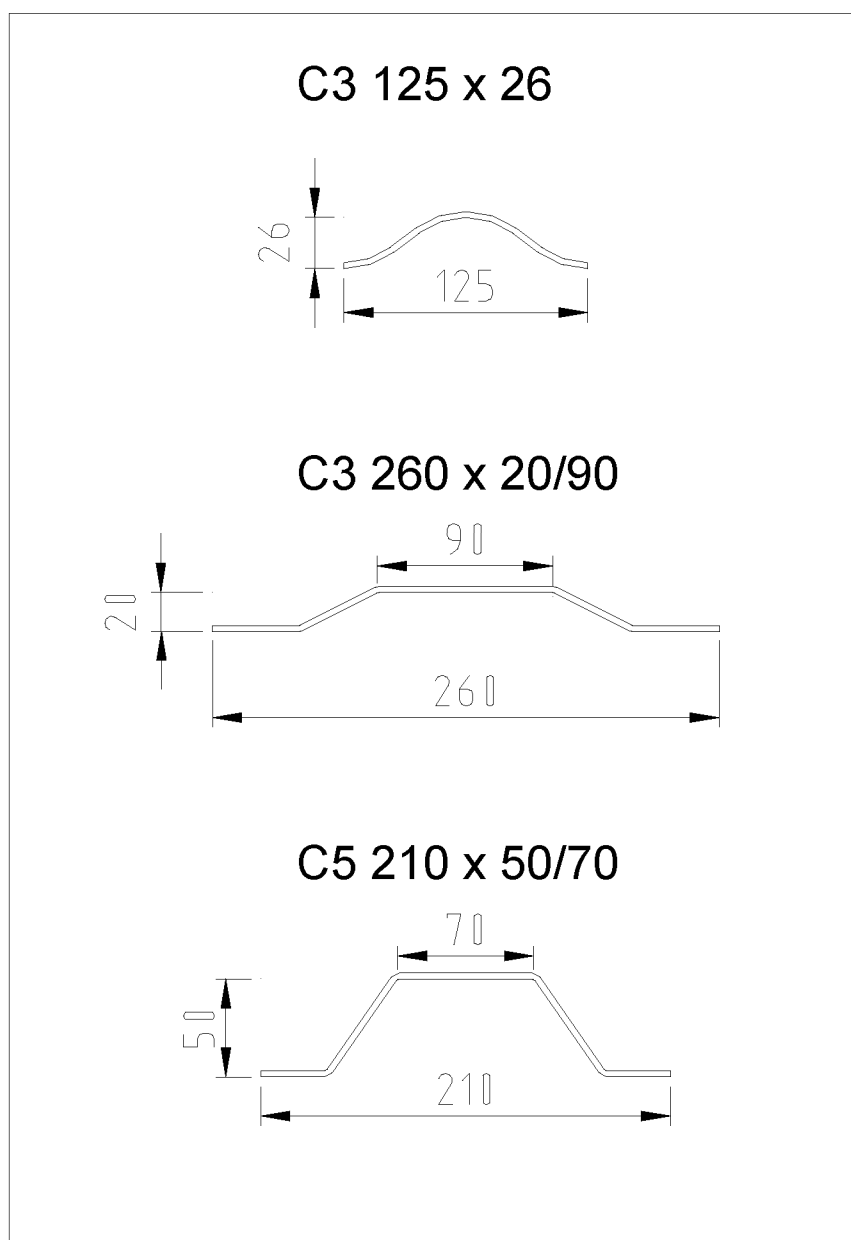
*Taulukko 3. Profiilin poikkileikkauksen taivutusvastus (teoreettinen minimiarvo)*

Levy- paksuus [mm]	Taivutusvastus [ $\text{cm}^3/\text{m}$ ]					
	Rakenne					
	A12	A2	A3	A4	C3	C5
2,5	37,2	39,7	105,1		16,7	48,0
3,0	44,4	46,8	125,9	136,0	19,7	57,0
3,5	51,5	54,0	146,6	160,8	23,0	66,1
4,0	58,6	61,4	167,2	185,5	26,3	75,5
4,5	65,6	68,6	187,6	210,3		
5,0	72,6	75,7	208,0	235,0		
5,5	79,5	82,8	228,3	259,4		
6,0	86,3	89,7	248,5	283,7		
6,5	93,2	96,6	268,6	306,7		
7,0	100,0	103,5	288,7	329,7		

Väliarvot interpoloidaan lineaarisesti.

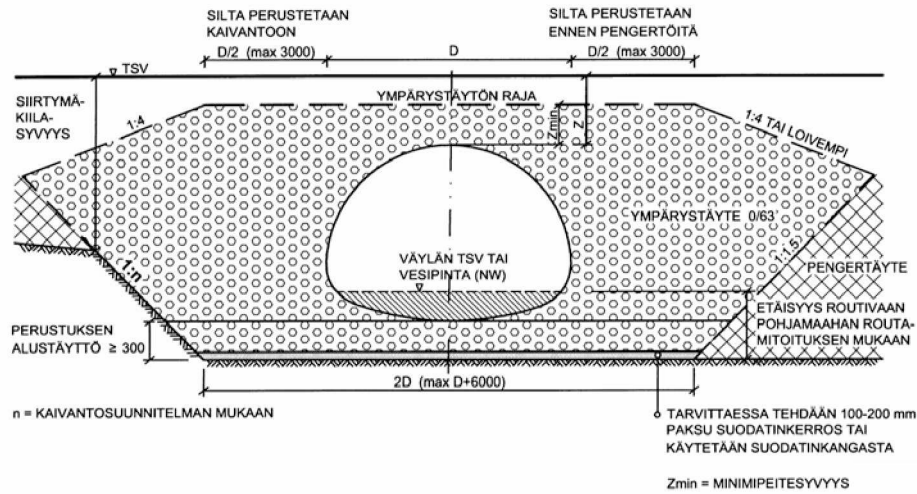


Kuva 1. Monilevyrakenteen aallotuksia (rakennetunnus A).

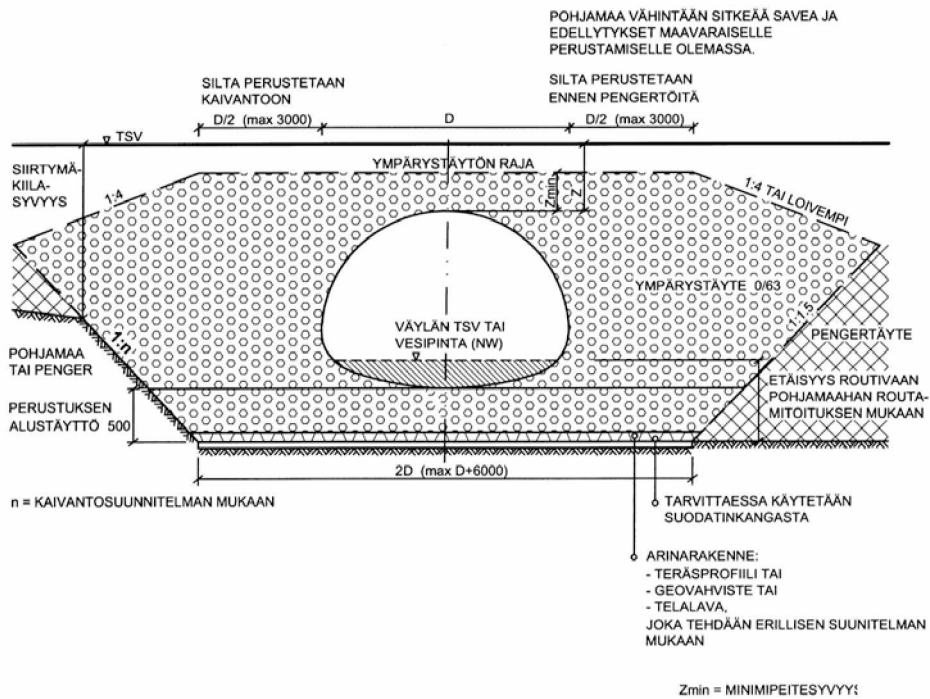


Kuva 2. Kierresaumatus rakenteen aallotuksia (rakennetunnus C)

Kuva 2. Perustamistapa B. Putken perustaminen routimattoman pohjamaan tai penkeen varaan.

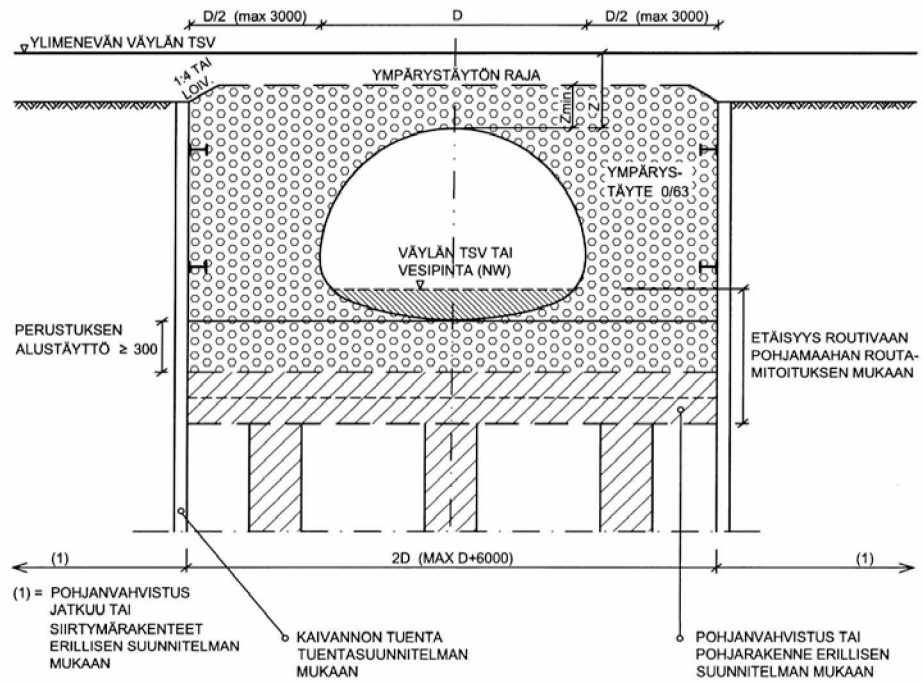


Kuva 3. Perustamistapa C. Putken perustaminen routivalle pohjamaalle.



Kuva 4. Perustamistapa D. Putken perustaminen pehmeikölle.





Kuva 5. Perustamistapa E. Putken perustaminen tuetussa kaivannossa.



# Mitoitusesimerkki

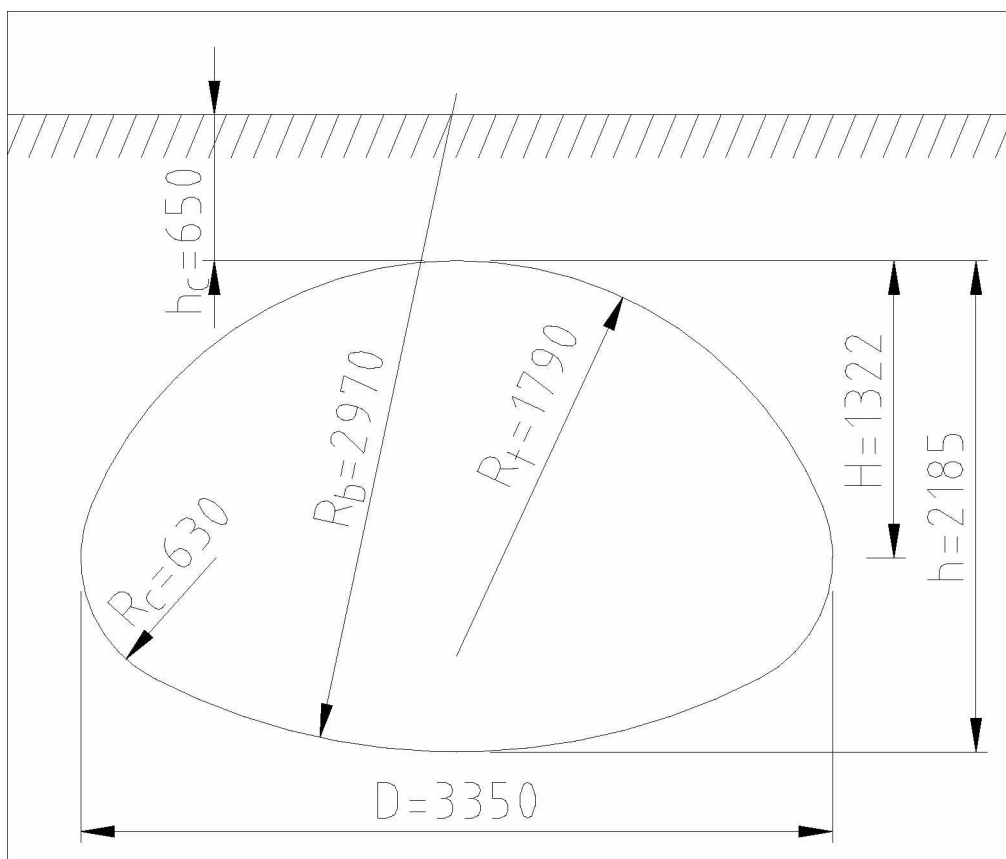
## 1 Lähtötiedot

Mitoitusesimerkissä on laskettu teräspanken laen kestävyys käyttö-, murto- ja väsytyssrajatilassa. Lisäksi laskenta on tehty putken laelle tulevan liitoksen kestävyydelle murto- ja väsytyssrajatilassa. Kuormina on käytetty staattisia kuormakaavioita LM1 ja LM2, sekä väsytyskuormakaaviota FLM4.

Taulukko 1. Mitoitusesimerkin lähtötiedot

Laskennassa tarvittavat lähtötiedot	Tunnus	Esimerkissä
Asennuspaikka (Penger / Kaivanto)		Kaivanto
Ympäristäyttö (Sora / Murske)		Murske
Peittosyvyys	$h_c$	650 mm
Putken poikkileikkaus (Ympyrä / Muu)		Muu
Putken leveys	$D$	3350 mm
Putken katon korkeus	$H$	1322 mm
Putken yläosan säde	$R_t$	1790 mm
Putken sivun säde	$R_c$	630 mm
Putken alaosan säde	$R_b$	2970 mm
Levyypaksuus	$t_y$	4 mm
Taivutusvastus	$W_y$	61,5 mm <sup>3</sup> /mm
Hitausmomentti	$I_y$	1813,8 mm <sup>4</sup> /mm
Poikkipinta-ala	$A_y$	4,74 mm <sup>2</sup> /mm
Teräksen myötölujuus	$f_y$	235 MPa
Teräksen murtolujuus	$f_u$	360 MPa
Teräksen kimmomoduli	$E_s$	210 GPa

Taulukon 1 ja kuvan 1 mitat ovat putken sisämittoja.



Kuva 1. Lähtötiedot

## 2 Osavarmuuskertoimet ja kuormat

(Pienin arvo tiealueella)

### Kuormakertoimet

Pysyvät, käyttörajatila:	$\gamma_{gk} := 1.0$
Pysyvät, murtorajatila max:	$\gamma_{gd.max} := 1.15$
Pysyvät, murtorajatila min:	$\gamma_{gd.min} := 0.9$
Liikennekuorma, käyttörajatila:	$\gamma_{pk} := 1.0$
Liikennekuorma, murtorajatila:	$\gamma_{pd} := 1.35$
Väsytyksrajatilan kuormat:	$\gamma_{Ff} := 1.0$

### Liikennekuormien sovituskerroin

Sovituskerroin, pienille putkille (LM1 ja LM2):	$\alpha_q = 0.87$
---	-------------------

### Materiaalikertoimet

#### Murtorajatila

Teräs:	$\gamma_{M0} := 1.0$
Liitokset, kestävyys:	$\gamma_{M2} := 1.25$
Liitokset, esijännitys:	$\gamma_{M7} := 1.1$
Liitokset, liukuma:	$\gamma_{M3} := 1.25$

#### Väsytyksrajatila

Teräs:	$\gamma_{Mf} = 1.05$
Liitokset, kestävyys:	$\gamma_{M2.f} = 1.05$
Liitokset, esijännitys:	$\gamma_{M7.f} = 1.0$
Liitokset, liukuma:	$\gamma_{M3.f} = 1.0$

### Geotekniset varmuuskertoimet

Geotekninen varmuus:	$\gamma_{n.geo} := 1.0$
Kitkakulman varmuus	$\gamma_{m.\varphi} := 1.0$
Tangenttimoduulin varmuus:	$\gamma_{m.E} := 1.0$
Ympäristäytön tilavuuspaino:	$\gamma_{m.surr} := 1.0$
Yläpuolisentäytön tilavuuspaino:	$\gamma_{m.cover} := 1.0$

### Liikennekuormat

#### LM1

$P_{traffic}$	$163.7 \frac{kN}{m}$
Pinta-ala kuorma:	$9.0 \frac{kN}{m^2}$

#### LM2

$P_{traffic}$	$188.9 \frac{kN}{m}$
---------------	----------------------

### 3 Voimasuureet

#### 3.1 Tehollinen peitesyvyys

$$E_{jd} := \frac{E_j}{\gamma_{n.geo} \cdot \gamma_{m.E}} \quad E_{jd} = 48.587 \text{ MPa}$$

$$\lambda_f := \frac{E_{jd} \cdot D^3}{E_s \cdot I_y} \quad \lambda_f = 4795.7$$

$$\delta_{hj\ddot{a}ssa} := 0.013 \cdot \frac{\gamma_{m.surr} \cdot \rho_1 \cdot D^2}{E_j} \cdot \left( \frac{H}{D} \right)^{2.8} \cdot \lambda_f^{0.56-0.2 \cdot \ln\left(\frac{H}{D}\right)} \quad \delta_{hj\ddot{a}ssa} = 2.599 \text{ mm}$$

$$h_{c.red} := h_c - \delta_{hj\ddot{a}ssa} \quad h_{c.red} = 0.647 \text{ m}$$

#### 3.2 Normaalivoimat

##### Normaalivoima maan painosta

$$\phi_{kd} := \text{atan} \left( \frac{\tan(\phi_k)}{\gamma_{n.geo} \cdot \gamma_{m.\phi}} \right) \quad \phi_{kd} = 45 \text{ deg}$$

$$S_v := \frac{0.8 \cdot \tan(\phi_{kd})}{\left( \sqrt{1 + \tan(\phi_{kd})^2} + 0.45 \cdot \tan(\phi_{kd}) \right)^2} \quad S_v = 0.23$$

$$\kappa := 2 \cdot S_v \cdot \frac{h_{c.red}}{D} \quad \kappa = 0.089$$

$$S_{ar.kaivanto} := \frac{1 - e^{-\kappa}}{\kappa} \quad S_{ar.kaivanto} = 0.957$$

$$S_{ar} := \text{if}(\text{Asennus} = 2, 1, S_{ar.kaivanto}) \quad S_{ar} = 0.957$$

$$D_d := \text{if}(D > 1.05 \cdot 2 \cdot R_s, 2 \cdot R_s, D) \quad D_d = 3.35 \text{ m}$$

$$N_j := 0.2 \cdot \frac{H}{D_d} \cdot \gamma_{m.surr} \cdot \rho_1 \cdot D_d^2 \dots \\ + S_{ar} \cdot \left( 0.9 \cdot \frac{h_{c.red}}{D} - 0.5 \cdot \frac{h_{c.red}}{D} \cdot \frac{H}{D} \right) \gamma_{m.cover} \cdot \rho_{cover} \cdot D^2$$

$$N_j = 49.222 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

### Normaalivoima liikennekuormasta

$$N_t(p_{\text{traf}}, q_1) := \begin{cases} p_{\text{traf}} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q_1 & \text{if } \left(\frac{h_{c.\text{red}}}{D}\right) \leq 0.25 \\ \left(1.25 - \frac{h_{c.\text{red}}}{D}\right) \cdot p_{\text{traf}} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q_1 & \text{if } 0.25 < \left(\frac{h_{c.\text{red}}}{D}\right) \leq 0.75 \\ 0.5 \cdot p_{\text{traf}} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q_1 & \text{if } 0.75 < \frac{h_{c.\text{red}}}{D} \end{cases}$$

### Mitoittava normaalivoima

#### Käyttörajatila:

$$N_k(p_{\text{traf}}, q_1) := \gamma_{gk} \cdot N_{j.KRT} + N_{t.KRT}(p_{\text{traf}}, q_1)$$

$$LM1 \quad N_{k.1} := N_k(\alpha_q p_{\text{traffic}_1}, \alpha_q q_1) \quad N_{k.1} = 204 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$LM2 \quad N_{k.2} := N_k(\alpha_q p_{\text{traffic}_2}, \alpha_q q_2) \quad N_{k.2} = 213 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

#### Murtorajatila:

$$N_d(p_{\text{traf}}, q_1) := \gamma_{gd.\text{max}} \cdot N_j + \gamma_{pd} \cdot N_t(p_{\text{traf}}, q_1)$$

$$LM1 \quad N_{d.1} := N_d(\alpha_q p_{\text{traffic}_1}, \alpha_q q_1) \quad N_{d.1} = 266 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$LM2 \quad N_{d.2} := N_d(\alpha_q p_{\text{traffic}_2}, \alpha_q q_2) \quad N_{d.2} = 278 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

#### Väsytyksrajatila:

Väsytystarkasteluita varten lasketaan kuormakaavion LM2 mukainen putken normaalivoima.

$$\Delta N_{d.f}(p_{\text{traf}}, q_1) := \gamma_{Ff} \cdot N_{t.KRT}(p_{\text{traf}}, q_1)$$

$$N_{LM2} := \Delta N_{d.f}(p_{\text{traffic}_2}, q_2) \quad N_{LM2} = 189 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

## 3.3 Taivutusmomenttien määrittäminen

### Taivutusmomentti maanpainosta

Apusuureet:

$$f_1 := \begin{cases} 0.67 + 0.87 \cdot \left(\frac{H}{D} - 0.2\right) & \text{if } 0.2 < \left(\frac{H}{D}\right) \leq 0.35 \\ 0.8 + 1.33 \cdot \left(\frac{H}{D} - 0.35\right) & \text{if } 0.35 < \left(\frac{H}{D}\right) \leq 0.5 \\ 2 \cdot \left(\frac{H}{D}\right) & \text{if } 0.5 < \left(\frac{H}{D}\right) \leq 0.6 \end{cases} \quad f_1 = 0.859$$

$$f_{2.surr} := \begin{cases} 0.0046 - 0.0010 \cdot \log(\lambda_f) & \text{if } \lambda_f \leq 5000 \\ 0.0009 & \text{if } \lambda_f > 5000 \end{cases} \quad f_{2.surr} = 9.192 \times 10^{-4}$$

$$f_{2.cover} := \begin{cases} 0.018 - 0.004 \log(\lambda_f) & \text{if } \lambda_f \leq 5000 \\ 0.0032 & \text{if } \lambda_f > 5000 \end{cases} \quad f_{2.cover} = 3.277 \times 10^{-3}$$

$$f_3 := 6.67 \cdot \frac{H}{D} - 1.33 \quad f_3 = 1.302$$

Momentti siinä tilanteessa kun täyttötyö on putken laen tasolla

$$M_{j.alku} := \gamma_{m.surr} \cdot \rho_1 \cdot D^3 \cdot (-f_1 \cdot f_3 \cdot f_{2.surr}) \quad M_{j.alku} = -0.812 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

Momentti lopputilanteessa

$$M_j := \gamma_{m.surr} \cdot \rho_1 \cdot D^3 \cdot \left[ -f_1 \cdot f_3 \cdot f_{2.surr} \dots \right. \\ \left. + S_{ar} \cdot \frac{\gamma_{m.cover} \cdot \rho_{cover}}{\gamma_{m.surr} \cdot \rho_1} \cdot \frac{h_{c.red}}{D} \cdot \left( \frac{R_t}{R_s} \right)^{0.75} \cdot f_1 \cdot f_{2.cover} \right] \\ M_j = -0.401 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

#### Taivutusmomentti liikennekuormasta

Apusuureet:  $\frac{h_{c.red}}{D} = 0.193$

$$f_{4i} := 0.65 \left( 1 - 0.2 \cdot \log(\lambda_f) \right) \quad f_{4i} = 0.171$$

$$f_{4ii} := \begin{cases} 0.120 \left( 1 - 0.15 \cdot \log(\lambda_f) \right) & \text{if } \lambda_f \leq 50000 \\ \text{"lambda liian suuri"} & \text{if } \lambda_f > 50000 \end{cases} \quad f_{4ii} = 0.054$$

$$f_{4iii} := 4 \cdot 0.01 \left( \frac{h_{c.red}}{D} \right) + 0.4 \quad f_{4iii} = 2.043$$

$$f_{4iv} := \left( \frac{R_t}{R_s} \right)^{0.25} \quad f_{4iv} = 1$$

$$M_t(p_{traf}, q_1) := f_{4i} \cdot f_{4ii} \cdot f_{4iii} \cdot f_{4iv} \cdot D \cdot p_{traf} + S_{ar} \cdot \left( \frac{R_t}{R_s} \right)^{0.75} \cdot f_1 \cdot f_{2.cover} \cdot q_1 \cdot D^2$$



### Mitoittava taivutusmomentti putken laella

Tutkittavat tapaukset:

1. Täyttötyö aikainen suurin taivutusmomentti
2. Ympäristäytön ja putken päällä olevan ajoneuvon aiheuttama taivutusmomentti
3. Ympäristäytön ja putken sivulla olevan ajoneuvon aiheuttama taivutusmomentti

#### **Käyttörajatila**

1. Työnaikainen tilanne:

$$M_{k.työ} := M_{j.alku} \quad M_{k.työ} = -0.812 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

2. Maksimi:

$$LM1 \quad M_{k.max.1} := M_{k.max}(\alpha_q p_{traffic_1}, \alpha_q q_1) \quad M_{k.max.1} = 8.8 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$LM2 \quad M_{k.max.2} := M_{k.max}(\alpha_q p_{traffic_2}, \alpha_q q_2) \quad M_{k.max.2} = 9.9 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

3. Minimi

$$LM1 \quad M_{k.min.1} := M_{k.min}(\alpha_q p_{traffic_1}, \alpha_q q_1) \quad M_{k.min.1} = -5 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$LM2 \quad M_{k.min.2} := M_{k.min}(\alpha_q p_{traffic_2}, \alpha_q q_2) \quad M_{k.min.2} = -5.6 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Mitoittava kuorma

$$LM1 \quad M_{k.1} := M(M_{k.työ}, M_{k.max.1}, M_{k.min.1}) \quad M_{k.1} = 8.792 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$LM2 \quad M_{k.2} := M(M_{k.työ}, M_{k.max.2}, M_{k.min.2}) \quad M_{k.2} = 9.934 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

#### **Murtorajatila**

1. Työnaikainen tilanne:

$$M_{d.työ} := \gamma_{gd.max} \cdot M_{j.alku} \quad M_{d.työ} = -0.934 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

2. Maksimi:

$$LM1 \quad M_{d.max.1} := M_{d.max}(\alpha_q p_{traffic_1}, \alpha_q q_1) \quad M_{d.max.1} = 12 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$LM2 \quad M_{d.max.2} := M_{d.max}(\alpha_q p_{traffic_2}, \alpha_q q_2) \quad M_{d.max.2} = 13.6 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

3. Minimi

$$LM1 \quad M_{d.min.1} := M_{d.min}(\alpha_q p_{traffic_1}, \alpha_q q_1) \quad M_{d.min.1} = -6.7 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$LM2 \quad M_{d.min.2} := M_{d.min}(\alpha_q p_{traffic_2}, \alpha_q q_2) \quad M_{d.min.2} = -7.4 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Mitoittava kuorma

$$LM1 \quad M_{d.1} := M(M_{d.työ}, M_{d.max.1}, M_{d.min.1}) \quad M_{d.1} = 12.049 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$LM2 \quad M_{d.2} := M(M_{d.työ}, M_{d.max.2}, M_{d.min.2}) \quad M_{d.2} = 13.592 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

#### **Väsytyksrajatila**

Väsytystarkasteluita varten lasketaan kuormakaavion LM2 mukainen putken laen taivutusmomentti.

$$M_{LM2} := \Delta M_{d.f}(p_{traffic_2}) \quad M_{LM2} = 11.553 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

## 4 Mitoitus

### 4.1 Pienimmät sallitut mitat

#### Peitesyvyys

$$h_{c.red} \geq 0.5m$$

$$h_{c.red} = 0.647m$$

Mitoitusehto1A = "OK"

#### Putken poikkileikkaus

$$D \geq 2.0m$$

Mitoitusehto1B = "OK"

$$100 \leq \lambda_f \leq 50000$$

Mitoitusehto1C = "OK"

#### Täytöt

$$a_1 > 0.2m$$

$$a_1 = 1.675m$$

Mitoitusehto1D = "OK"

$$a_2 \geq 0.3m$$

$$a_2 = 0.3m$$

Mitoitusehto1E = "OK"

$$a_3 \geq \min\left(3.0m, \frac{D}{2}\right)$$

$$\min\left(3.0m, \frac{D}{2}\right) = 1.675m$$

Mitoitusehto1F = "OK"

### 4.2 Sallittu liikennekuormien aiheuttama taivutus

Aallotetun teräspankkin voimasuureet voidaan laskea ruotsalaisen mitoitusmallin mukaan, jos ehto  $f_{4i} \cdot f_{4iii} < 1.0$  täyttyy.

$$f_{4i} \cdot f_{4iii} = 0.35$$

Mitoitusehto1G = "OK"

### 4.3 Putkisillan mitoitus käyttörajatilassa

$$f_{yk} = 235 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma(N_{d,s}, M_{d,s}) := \frac{N_{d,s}}{A_y} + \frac{|M_{d,s}|}{W_y}$$

Mitoitusehto

$$\sigma_{krt}(N_{d,s}, M_{d,s}) := \frac{\sigma(N_{d,s}, M_{d,s})}{f_{yk}}$$

Putken laella

$$LM1 \quad KA1_1 := \sigma_{krt}(N_{k,1}, M_{k,1}) \quad KA1_1 = 79. \%$$

$$LM2 \quad KA1_2 := \sigma_{krt}(N_{k,2}, M_{k,2}) \quad KA1_2 = 88. \%$$

Mitoitusehto1 = "OK"

### 4.4 Putkisillan mitoitus murtorajatilassa / putken yläosa

#### 4.4.1 Yhdistetyt rasitukset

Kun tutkitaan normaalivoiman ja momentin yhdistelmää

$$\xi_{NM} := 1.0$$

$$\kappa_2 := \frac{h_{c,red}}{R_t}$$

$$\kappa_2 = 0.362$$

$$\eta_j := 1 - \left( \frac{1}{1 + \kappa_2} \right)^2$$

$$\eta_j = 0.461$$

$$\mu := \left[ 1.22 + 1.95 \cdot \left( \frac{E_s \cdot I_y}{\eta_j \cdot E_{jd} \cdot R_t^3} \right)^{0.25} \right]^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{\eta_j}}$$

$$\mu = 4.134$$

$$N_{cr,el,NM} := \frac{3\xi_{NM}}{\mu} \cdot \sqrt{\frac{E_{jd} \cdot E_s \cdot I_y}{R_t}}$$

$$N_{cr,el,NM} = 2333.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_u := \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \cdot A_y$$

$$N_u = 1113.9 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Nurjahduskuorma

$$N_{cr,NM} := \begin{cases} N_{cr,el,NM} & \text{if } \left( \frac{N_{cr,el,NM}}{N_u} \right) \leq 0.5 \\ N_u \cdot \left( 1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{N_u}{N_{cr,el,NM}} \right) & \text{if } \left( \frac{N_{cr,el,NM}}{N_u} \right) > 0.5 \end{cases}$$

$$N_{cr,NM} = 980.958 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\omega_{NM} := \begin{cases} \frac{N_{cr.NM}}{N_u} & \text{if } \left( \frac{N_{cr.el.NM}}{N_u} \right) \leq 0.5 \\ 1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{N_u}{N_{cr.el.NM}} & \text{if } \left( \frac{N_{cr.el.NM}}{N_u} \right) > 0.5 \end{cases}$$

$$\eta := \frac{W_{y.pl}}{W_y} \quad \eta = 1.354$$

$$\alpha_{c.NM} := \begin{cases} \eta^2 \cdot \omega_{NM} & \text{if } (\eta^2 \cdot \omega_{NM}) \geq 0.8 \\ 0.8 & \text{if } (\eta^2 \cdot \omega_{NM}) < 0.8 \end{cases}$$

**Tarkastus yhdistetyille rasiuksille**

$$B_2(N_{d.u}, M_{d.u}) := \left( \frac{N_{d.u}}{N_{cr.NM}} \right)^{\alpha_{c.NM}} + \frac{|M_{d.u}|}{M_{y.Rk}}$$

Putken laella

$$LM1 \quad KA2_1 := B_2(N_{d.1}, M_{d.1}) \quad KA2_1 = 74. \%$$

$$LM2 \quad KA2_2 := B_2(N_{d.2}, M_{d.2}) \quad KA2_2 = 82. \%$$

Mitoitusehto2 = "OK"

**4.4.2 Normaalivoima**

Apusuureet:

$$\text{Kun tutkitaan normaalivoimaa} \quad \kappa_2 = 0.362$$

$$\xi_N := \begin{cases} \sqrt{\kappa_2} & \text{if } \sqrt{\kappa_2} \leq 1.0 \\ 1 & \text{if } \sqrt{\kappa_2} > 1.0 \end{cases} \quad \xi_N = 0.601$$

$$\eta_j = 0.461$$

$$\mu = 4.134$$

$$N_{cr.el} := \frac{3\xi_N}{\mu} \cdot \sqrt{\frac{E_{jd} \cdot E_s \cdot I_y}{R_t}} \quad N_{cr.el} = 1403.234 \frac{kN}{m}$$

$$N_u = 1113.9 \frac{kN}{m}$$

$$N_{cr} := \begin{cases} N_{cr,el} & \text{if } \left( \frac{N_{cr,el}}{N_u} \right) \leq 0.5 \\ N_u \cdot \left( 1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{N_u}{N_{cr,el}} \right) & \text{if } \left( \frac{N_{cr,el}}{N_u} \right) > 0.5 \end{cases} \quad \begin{aligned} \frac{N_{cr,el}}{N_u} &= 1.26 \\ N_{cr} &= 892.844 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \end{aligned}$$

$$\omega := \begin{cases} \frac{N_{cr}}{N_u} & \text{if } \left( \frac{N_{cr,el}}{N_u} \right) \leq 0.5 \\ 1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{N_u}{N_{cr,el}} & \text{if } \left( \frac{N_{cr,el}}{N_u} \right) > 0.5 \end{cases} \quad \omega = 0.802$$

$$\eta = 1.354$$

$$\alpha_c := \begin{cases} \eta^2 \cdot \omega & \text{if } (\eta^2 \cdot \omega) \geq 0.8 \\ 0.8 & \text{if } (\eta^2 \cdot \omega) < 0.8 \end{cases} \quad \begin{aligned} \eta^2 \cdot \omega &= 1.471 \\ \alpha_c &= 1.471 \end{aligned}$$

$$M_u := \eta \cdot W_y \cdot f_{yk} \quad M_u = 19.575 \text{ kN}$$

#### Tarkastus normaalivoimalle

$$B_N(N_{d,u}) := \left( \frac{N_{d,u}}{\omega \cdot f_{yk} \cdot A_y} \right)^{\alpha_c}$$

$$LM1 \quad KA3_1 := B_N(N_{d,1}) \quad KA3_1 = 17. \%$$

$$LM2 \quad KA3_2 := B_N(N_{d,2}) \quad KA3_2 = 18. \%$$

Mitoitusehto3 = "OK"

#### 4.5 Putkisillan mitoitus murtorajatilassa / putken alaosa

$$\xi_a := 1 \quad \mu_a := 1.22$$

$$N_{cr,el,a} := \frac{3\xi_a}{\mu_a} \cdot \sqrt{\frac{E_{jd} \cdot E_s \cdot I_a}{R_b}} \quad N_{cr,el,a} = 6138.32 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{u,a} := \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \cdot A_a \quad N_{u,a} = 1.114 \times 10^3 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{cr,a} := \begin{cases} N_{cr,el,a} & \text{if } \left( \frac{N_{cr,el,a}}{N_{u,a}} \right) \leq 0.5 \\ N_{u,a} \cdot \left( 1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{N_{u,a}}{N_{cr,el,a}} \right) & \text{if } \left( \frac{N_{cr,el,a}}{N_{u,a}} \right) > 0.5 \end{cases} \quad N_{cr,a} = 1063.366 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

**Tarkistus normaalivoimalle**

$$B_{N\_A}(N_{d,u}) := \frac{N_{d,u}}{N_{cr,a}}$$

$$LM1 \quad KA4_1 := B_{N\_A}(N_{d,1})$$

$$KA4_1 = 25\%$$

$$LM2 \quad KA4_2 := B_{N\_A}(N_{d,2})$$

$$KA4_2 = 26\%$$

Mitoitusehto4 = "OK"

**4.6 Pulttiliitoksen mitoitus murtorajatilassa**

Pultit M20 Lujuus 8.8

$$d_b := 20\text{mm}$$

Pultin murtolujuus:

$$f_{ub} := 800\text{MPa}$$

Pultin reiän halkaisija

$$d_0 := 24\text{mm}$$

Pulttien lukumäärä (kpl/m):

$$n_b = 10 \frac{1}{m}$$

Pultin tehokas poikkileikkausala:

$$A_{eff} := 0.78 \cdot \pi \cdot \frac{d_b^2}{4}$$

$$A_{eff} = 245 \cdot \text{mm}^2$$

Pultin tehokas halkaisija:

$$d_{eff} := \sqrt{\frac{4A_{eff}}{\pi}}$$

$$d_{eff} = 18 \cdot \text{mm}$$

Pultin kannan halkaisija:

$$D_b := 34\text{mm}$$

Pultin esijännitysvoima:

$$F_{b,pre} := 97\text{kN}$$

Levyjen välinen kitkakerroin (väsytyks):

$$\mu_f := 0.4$$

Pulttien reunaetäisyys:

$$e_1 = 35 \cdot \text{mm}$$

Pulttien etäisyys aallon suunnassa:

$$p_2 = 50 \cdot \text{mm}$$

Kauemman pultin etäisyys profiilin reunasta:

$$a := e_1 + p_2$$

$$a = 85 \cdot \text{mm}$$

**Pultin kestävyys**

Kerroin

$$\alpha_v := 0.6$$

$$k_2 := 0.9$$

Pultin vetolujuuden laskenta-arvo:

$$f_{rtd} := 0.85 \cdot \frac{f_{ub}}{\gamma_{M2}} \quad f_{rtd} = 544 \text{ MPa}$$

Pultin leikkauslujuuden laskenta-arvo:

$$f_{rvd} := 0.85 \cdot \alpha_v \cdot \frac{f_{ub}}{\gamma_{M2}} \quad f_{rvd} = 326.4 \text{ MPa}$$

**Pultin leikkausvoimakestävyys**

$$F_{Rv} := n_b \cdot f_{rvd} \cdot A_{eff} \quad F_{Rv} = 799.824 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Mitoitusehto

$$T_b(N_{d,u}) := \frac{N_{d,u}}{F_{Rv}}$$

$$LM1 \quad KA5_1 := T_b(N_{d,1}) \quad KA5_1 = 33. \%$$

$$LM2 \quad KA5_2 := T_b(N_{d,2}) \quad KA5_2 = 35. \%$$

Mitoitusehto5 = "OK"

**Pultin varren suuntainen vetovoimakestävyys**

Pultin murtuminen

$$F_{Rt1} := k_{b,1} \cdot n_b \cdot k_2 \cdot f_{rtd} \cdot A_{eff} \quad F_{Rt1} = 599.868 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Pultin kannan läpileikkautuminen

$$F_{Rp} := 0.6 \cdot k_{b,1} \cdot n_b \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \cdot t_y \cdot \pi \cdot D_b \quad F_{Rp} = 369.15 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Määräävämpi edellisistä

$$F_{Rt} := \min(F_{Rt1}, F_{Rp}) \quad F_{Rt} = 369.15 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Mitoitusehto

$$F_b(M_{d,u}) := \frac{|M_{d,u}|}{a} \cdot \frac{1}{F_{Rt}}$$

Putken laella:

$$LM1 \quad KA6_1 := F_b(M_{d,1}) \quad KA6_1 = 38. \%$$

$$LM2 \quad KA6_2 := F_b(M_{d,2}) \quad KA6_2 = 43. \%$$

Mitoitusehto6 = "OK"

**Pultin yhdistetty veto- ja leikkausvoimakestävyys**

Mitoitusehto

$$NM_b(N_{d,u}, M_{d,u}) := \frac{N_{d,u}}{F_{Rv}} + \frac{|M_{d,u}|}{1.4 \cdot a} \cdot \frac{1}{F_{Rt1}}$$

Putken laella:

$$\begin{array}{ll} LM1 & KA7_1 := NM_b(N_{d,1}, M_{d,1}) \quad KA7_1 = 50.\% \\ LM2 & KA7_2 := NM_b(N_{d,2}, M_{d,2}) \quad KA7_2 = 54.\% \end{array}$$

Mitoitusehto7 = "OK"

**Reunapuristus- ja reunarepeytymiskestävyys**

$$\alpha_b := \min\left(\frac{f_{ub}}{f_u}, 1.0\right) \quad \alpha_b = 1$$

$$k_1 := \min\left(2.8 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1.7, 2.5\right) \quad k_1 = 2.5$$

Ylisuuren rei'än vähennyskerroin

$$k_3 := 0.8$$

$$F_{Rh1} := k_3 \cdot n_b \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d_{eff} \cdot t_y}{\gamma_{M2}} \quad F_{Rh1} = 406.968 \frac{kN}{m}$$

$$F_{Rh} := \begin{cases} F_{Rh1} & \text{if } \frac{F_{Rv}}{F_{Rh1}} > 1.25 \\ \frac{F_{Rv}}{1.25} & \text{if } \frac{F_{Rv}}{F_{Rh1}} \leq 1.25 \end{cases} \quad \frac{F_{Rv}}{F_{Rh1}} = 1.965$$

$$F_{Rh} = 406.968 \frac{kN}{m}$$

Mitoitusehto

$$\Sigma_b(N_{d,u}) := \frac{N_{d,u}}{F_{Rh}}$$

$$\begin{array}{ll} LM1 & KA8_1 := \Sigma_b(N_{d,1}) \quad KA8_1 = 65.\% \\ LM2 & KA8_2 := \Sigma_b(N_{d,2}) \quad KA8_2 = 68.\% \end{array}$$

Mitoitusehto8 = "OK"



## 4.7 Tehollisen poikkileikkauksen tarkastus

Vähennetään poikkileikkauksesta pultinreikien määrä.

$$A_{\text{net.1}} := A_y - t_y \cdot d_0 \cdot \frac{n_b}{2} \quad A_{\text{net.1}} = 4260 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Mitoitusehto

$$KA9 := \frac{A_y \cdot f_{yk} \cdot (\gamma_{M0})^{-1}}{0.9 \cdot A_{\text{net.1}} \cdot f_u \cdot (\gamma_{M2})^{-1}} \quad KA9 = 101\%$$

Mitoitusehto9 = "Ylitys < 3%. OK"

## 4.8 Putkisillan väsytsmitoitus

Teräspanksillojen väsytsmitoitus tehdään tavallisesti kuormakaaviolla FLM4. Tässä esimerkissä on väsytskestävyys tarkastettu käyttämällä suunnitteluohjeen mukaista laskentamenetelmää, joka perustuu kuormakaavioon FLM4.

### 4.8.1 Profiilin väsytsmitoitus

Liikenneluokka:

2000000
500000
125000
50000

Suunniteltukäyttöikä := 50

Liikenteen kokonaismäärä:

$$N_{\Sigma} := \text{Suunniteltukäyttöikä} \cdot n_1 \quad N_{\Sigma} = 2.5 \times 10^7$$

Liikenteentyppi :=

Kaukoliikenne
Keskipitkä liikenne
Paikallisliikenne

Väsymislujuus:

Tarkistetaan kitkan vaikutus:

$$k_s := 1$$

Pultin esijännitysvoima:

$$F_{b.pre} = 97 \cdot \text{kN}$$

Väsytsrajatilassa suurin pulttiin syntyvä vetovoima on 40% kuormakaavion LM2 aiheuttamasta vetovoimasta.

$$F_{t.Ef} := 40\% \cdot \frac{M_{LM2}}{a} \cdot \frac{1}{2 \cdot n_b} \quad F_{t.Ef} = 2.718 \cdot \text{kN}$$

Kitkavoiman mitoitusarvo

$$F_{s,Rf} := \frac{k_s \cdot \mu_f \cdot \left( \frac{F_{b,pre}}{\gamma_{M7,f}} - 0.8 \cdot F_{t,Ef} \right)}{\gamma_{M3,f}} \quad F_{s,Rf} = 37.93 \cdot \text{kN}$$

Väsytyksrajatilassa suurin pulttiin syntyvä leikkausvoima on 40% kuormakaavion LM2 aiheuttamasta leikkausvoimasta.

$$N_{f,max} := \frac{40\% N_{LM2}}{n_b} \quad N_{f,max} = 7.556 \cdot \text{kN}$$

Reikien vaikutus väsymisluokkaan:

$$VL := \frac{N_{f,max}}{F_{s,Rf}} \quad VL = 20\%$$

**VL<sub>1</sub> = "Väsytyksmitoitusta ei tarvitse tehdä rei'itetyille teräkselle."**

Väsymisluokka := 160

Väsymislujuuden referenssiarvo, kun kuormituskertoja 2 milj.

$$\Delta\sigma_c = 152.29 \cdot \text{MPa}$$

Vakioamplitudinen väsymisraja

$$\Delta\sigma_D := 0.737 \cdot \Delta\sigma_c = 112.238 \cdot \text{MPa}$$

Liikennekuorman aiheuttama taivutusmomentin vaihteluväli putken laella:

$$\Delta M_{fat} := \left( 1.0 + \frac{D - 2m}{12m} \right) \cdot |M_{LM2}| \quad \Delta M_{fat} = 12.853 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Liikennekuorman aiheuttama jännitysvaihteluväli putken laella:

$$\Delta\sigma_R := \frac{\Delta M_{fat}}{W_y} \quad \Delta\sigma_R = 208.994 \cdot \text{MPa}$$

Kertoimet

Liikenteen tyyppi ja peitesyvyys

$$\lambda_n = 5.4 \times 10^{-3}$$

Suurten ja pienten jännitysten redusointi

$$\lambda_\sigma = 0.785$$

Mitoitusehdot

Putken laella

$$KA10 := \lambda_n \cdot \lambda_\sigma \cdot \frac{\Delta\sigma_R^5}{\Delta\sigma_D^5} \cdot \frac{N_\Sigma}{5 \cdot 10^6} \quad KA10 = 47\%$$

**Mitoitusehto10 = "OK"**

## 4.8.2 Liitosten väsytyksimitoitus

### Pultin leikkausvoimakkestävyys

Väsymisluokka1 := 100

Väsymislajuuden referenssiarvo, kun kuormituskertoja 2 milj.

$$\Delta\tau_{c.b} = 100 \cdot \text{MPa}$$

$$\Delta\tau_{c.b.d} := \frac{\Delta\tau_{c.b}}{\gamma_{Mf}}$$

$$\Delta\tau_{c.b.d} = 95.181 \cdot \text{MPa}$$

Pultin leikkausjännityksen vaihteluväli:

$$\Delta\tau_{R.b} := \frac{N_{LM2}}{n_b \cdot A_{eff}}$$

Kertoimet

Liikenteen tyyppi ja peitesyvyys

$$\lambda_n = 5.4 \times 10^{-3}$$

Suurten ja pienten jännitysten redusointi

$$\lambda_{\tau.b} = 0$$

Mitoitusehto

$$KA11 := \lambda_n \cdot \lambda_{\tau.b} \cdot \frac{\Delta\tau_{R.b}^5}{\Delta\tau_{c.b.d}^5} \cdot \frac{N_{\Sigma}}{2 \cdot 10^6}$$

$$KA11 = 0.0\%$$

Mitoitusehto11 = "OK"

### Pultin varren suuntainen vetovoimakkestävyys

Väsymisluokka2 := 80

Väsymislajuuden referenssiarvo, kun kuormituskertoja 2 milj.

$$\Delta\sigma_{c.b} = 80 \cdot \text{MPa}$$

$$\Delta\sigma_{c.b.d} := \frac{\Delta\sigma_{c.b}}{\gamma_{M2.f}}$$

$$\Delta\sigma_{c.b.d} = 76.145 \cdot \text{MPa}$$

$$\Delta\sigma_{D.b} := 0.737 \Delta\sigma_{c.b.d}$$

Ekvivalentti vakioamplitudinen vaihteluväli

Putken laella:

$$\Delta\sigma_{R.b} := \frac{M_{LM2}}{a} \cdot \frac{1}{k_{b.1} \cdot n_b \cdot A_{eff}}$$

Kertoimet

Liikenteen tyyppi ja peitesyvyys

$$\lambda_n = 5.4 \times 10^{-3}$$

Suurten ja pienten jännitysten redusointi

$$\lambda_{\sigma.b} = 0.812$$

Mitoitusehdot

Putken laella:

$$KA12 := \lambda_n \cdot \lambda_{\sigma.b} \frac{\Delta\sigma_{R.b}^5}{\Delta\sigma_{D.b}^5} \cdot \frac{N_{\Sigma}}{5 \cdot 10^6} \quad KA12 = 66. \%$$

Mitoitusehto12 = "OK"

**Pultin yhdistetty leikkaus ja vetovoimakestävyys**

Putken laella:

$$KA13 := KA11 + KA12 \quad KA13 = 66. \%$$

Mitoitusehto13 = "OK"



